



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

Thèse de doctorat

Spécialité : Agronomie

Option : Pédologie

Présentée par

Sophia MOUAS BOURBIA

Biodisponibilité du potassium dans la rhizosphère de *Olea europea* L.

Présentée devant le jury composé de :

Mr YEFSAH Said	Professeur	(UMMTO)	Président
Mr DERRIDJ Arezki	Professeur	(UMMTO)	Rapporteur
Mr VELDE Bruce	Professeur Emérite	(ENS, Paris)	Co-Rapporteur
Mr DAOUD Youcef	Professeur	(ENSA, Alger)	Examineur
Mr SIDI Hachemi	Maître de C.(A)	(U.MIRA, Bejaia)	Examineur

A
mon père

Remerciements

Cette thèse est l'aboutissement d'un long parcours, sur lequel de nombreuses personnes m'ont accompagnée. Je tiens donc à les remercier tout particulièrement et je présente par avance mes excuses à ceux que j'aurais oubliés. Au delà de tout cela, je sais que la providence de Dieu a écrit son nom sur chacun des chapitres de cette thèse. Pour cela, je Lui en suis profondément reconnaissante.

Premièrement, j'aimerais remercier les membres du jury.

*Mes plus vifs remerciements vont **Mr Saïd YEFSAH** Professeur à l'UMMTO qui a accepté de présider le jury et d'examiner ce travail. L'extraction des argiles n'a été rendu possible que grâce à l'accueil bienveillant de **Mr Saïd YEFSAH** qui a mis à ma disposition les ultrasons et m'a permis aussi de passer des échantillons au diffractomètre des RX. Je ne peux oublier ses explications au sujet du logiciel de quantification des argiles Decomp.*

*J'exprime toute ma gratitude à **Mr Youcef DAOUD**, Professeur à l'ENSA d'Alger pour avoir accepté d'une part d'examiner mon travail et d'autre part d'avoir été à maintes reprises à mon écoute. Je le remercie pour ses remarques et ses conseils précieux. Son aide a été précieuse pour la préparation du protocole expérimental du chapitre 4.*

*Mes plus vifs remerciements vont aussi à **Mr Hachemi SIDI**, Maître de conférences à l'Université*

MIRA de Bejaia pour avoir accepté de se déplacer à ma soutenance et d'évaluer mon travail de thèse.

*Je tiens à remercier chaleureusement **Mr Arezki DERRIDJ** Professeur à l'UMMTO pour avoir accepté d'encadrer ce travail, de m'avoir accordée sa confiance et de m'avoir toujours encouragée malgré les nombreuses difficultés rencontrées.*

*Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à **Mr Bruce VELDE**, Professeur émérite à l'ENS de Paris qui a accepté de codiriger ce travail et a fait passer ma thèse à la vitesse supérieure grâce à la mise à ma disposition du logiciel de quantification des argiles Décomp. Que ce soit au cours de stages ou de la formation à distance, **Mr Bruce VELDE** n'a jamais cessé d'être attentif à la progression de mon travail.*

*Cette thèse n'aurait pu voir le jour sans la participation active de **Mr Pierre BARRE**, maitre de conférences à l'ENS de Paris. Je lui exprime toute ma reconnaissance. Il m'a fait confiance à une étape décisive de ma thèse, au moment où j'en avais grandement besoin. Son enthousiasme à toute épreuve était contagieux.*

*Ce travail a été réalisé au sein du laboratoire Ressources Naturelles de l'UMMTO. Sans le soutien et l'aide de **Mr Omar BENMOUFFOK** lorsqu'il a fallu commander du matériel, ce travail aurait été bien plus modeste. C'est avec tristesse, car il n'est plus parmi nous, que je lui exprime toute ma reconnaissance.*

*Mes remerciements vont aussi à **M^{me} Noria SMAIL SAADOUNE** directrice du même laboratoire qui souvent a été attentive et disponible pour la résolution de difficultés liées à la disponibilité du matériel.*

*Une partie de ce travail a été réalisée au sein de l'UMR du laboratoire de géologie de l'ENS de Paris, mes remerciements vont aussi au directeur de ce laboratoire **Mr Christian Chopin**.*

J'exprime aussi mes remerciements à :

***Mr Nacer ALLILI** qui répondait présent à chaque fois que je l'ai sollicité pour le montage d'un dispositif expérimental.*

***Mr Hamid MADIOU** qui m'a aidée à réaliser l'analyse statistique de mes données.*

***M^{me} Nicole CATEL** de l'ENS de Paris qui a accepté de sacrifier ses lundis alors qu'elle était en retraite pour doser le potassium de mes échantillons.*

***Mr Nathaniel FINDING** et **Mr Bertrand DOUMERT** qui ont passé mes nombreuses lames d'argiles au diffractomètre de RX du laboratoire de géologie de l'ENS.*

Mr Philippe HINSINGER** de l'INRA de Montpellier qui a eu la gentillesse de m'orienter vers le laboratoire de géologie de L'ENS de Paris ce qui m'a permis de rencontrer **Mr Bruce

***VELDE** et **Mr. Pierre BARRE**.*

***Mr Daniel TESSIER** pour l'intérêt qu'il a témoigné à mon travail en général et plus pratiquement pour sa disponibilité lors de l'interprétation des diffractogrammes des RX des argiles.*

***Mr Jean Claude FARDEAU** de m'avoir suivi par ses conseils pendant le cheminement de ce travail.*

***Mr Omar BESSAOUD** qui m'a accueillie au CIHEAM de Montpellier, ce qui m'a permis de rencontrer **Mr Philippe HINSINGER**.*

***M^{me} Rabiha YEFSAH** pour sa disponibilité lors des analyses de sols.*

***M^{me} FEKNOUS**, **M^r Kadour DJILLI** et **Redouane** du département des Sciences du Sol de l'ENSA El Harrach d'Alger.*

Il m'est également impossible d'oublier la gentillesse, la disponibilité mais surtout la patience de M^{me} Malika YAHIAOUI et M^{elle} Djamila ISSAOUN lorsque nous devons recommencer les analyses de sol et les tests statistiques.

Je souhaiterais également remercier les personnes avec qui j'ai travaillé au quotidien, ce sont les dernières que je remercie mais non les moins importantes :

M^{me} Zohra BOUZELHA-BELLABAS et Mme Malika BOUDIAF-NAIT KACI avec lesquelles je me suis lancée dans l'aventure parfois périlleuse de la rhizosphère.

M^{me} Malika MOUFFOK qui m'a aidée dans tout ce qui à trait à la minéralogie des argiles dans mon travail.

M^{me} Dalila LOUNI et M^{me} Nacera ZERROUKI qui n'ont pas cessé de me soutenir dans les moments de découragement.

Tous les étudiants et étudiantes qui ont participé activement à la réalisation de ma thèse lors de leur mémoire d'ingénieur. Ils m'ont secondée efficacement dans la récolte et l'analyse des échantillons.

Je remercie aussi les agriculteurs qui m'ont permis d'échantillonner les sols et les feuilles pendant la récolte des olives.

Je dois également beaucoup à ma famille, mes amis(es) pour leur soutien moral

Sommaire

Introduction générale	-10-
A-Synthèse bibliographique	- 14 -
1. Potassium dans les sols	- 14 -
1.1. Généralités sur le potassium	- 14 -
1.2. Formes du potassium dans le sol	- 14 -
1.3. Dynamique du potassium dans le sol	- 15 -
1.4. Fixation et libération du potassium	- 16 -
2. Argiles dans les sols	- 17 -
2.1. Principaux types de minéraux argileux dans les sols	- 17 -
2.2. Argiles et le potassium dans les sols	- 18 -
3. Rôles et importance du potassium dans la plante	- 18 -
4. Interface Sol / Racine: la rhizosphère	- 19 -
4.1. Concept de la rhizosphère	- 19 -
4.2. Extension spatiale de la rhizosphère	- 21 -
4.3. Fonctions de la rhizosphère	- 22 -
4.3.1. La rhizodéposition et l'effet rhizosphérique	- 22 -
4.4. Principaux changements dans la rhizosphère	- 25 -
4.4.1. Changement des propriétés biologiques	- 26 -
4.4.2. Changement des propriétés physiques	- 26 -
4.4.3. Changement des propriétés chimiques	- 27 -
4.4.4. Changement de la minéralogie	- 31 -
5. Biodisponibilité des nutriments et fonctionnement de la rhizosphère	- 36 -
6. Potassium dans la rhizosphère	- 38 -
6.1. Formes bio disponibles du potassium dans la rhizosphère	- 38 -
6.2. Fixation du potassium dans la rhizosphère	- 43 -
7. Influence des espèces sur la rhizosphère	- 45 -
8. Concept de gestion de la rhizosphère	- 46 -
9. Culture de l'olivier	- 50 -
9.1. Exigences éco pédologiques	- 51 -
9.2. Fertilisation de l'olivier	- 53 -
10. Culture du figuier	- 54 -
10.1. Exigences éco pédologiques	- 54 -
11. Problématique	- 55 -
11.1. Hypothèses de travail	- 56 -
11.2. Démarche	- 56 -
B- Matériels et méthodes	- 58 -

Sommaire

1. Présentation de la zone d'étude.....	- 58 -
1.1. Géologie des régions d'étude	- 58 -
1.2. Climat	- 58 -
1.2.1. Pluviométrie	- 58 -
1.2.2. Températures.....	- 61 -
1.2.3. Evapotranspiration	- 61 -
1.2.4. Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gausсен	- 62 -
2. Choix des parcelles d'échantillonnage.....	- 62 -
2.1. Vergers d'oliviers	- 62 -
2.2. Vergers de figuiers	- 64 -
2.3. Sols	- 64 -
2.3.1. Echantillonnage du sol global et du sol rhizosphérique.....	- 64 -
2.3.2. Echantillonnage du sol global, du sol rhizosphérique et du rhizoplan.....	- 64 -
2.4. Végétal.....	- 65 -
3. Analyse des sols et du végétal échantillonnés.....	- 65 -
3.1. L'analyse des sols.....	- 65 -
3.2. Méthodes de préparation des argiles pour l'étude minéralogique.....	- 66 -
3.2.1. Méthode chimique.....	- 66 -
3.2.2. Méthode physique	- 67 -
3.2.3. Saturation des argiles prélevées	- 67 -
3.3. Analyse des argiles par la diffraction des Rayons X.....	- 68 -
3.3.1. Préparation des lames.....	- 68 -
3.3.2. Identification des populations d'argile par modélisation des pics de diffraction.....	- 69 -
3.4. Analyse du végétal	- 71 -
C- Statut potassique du sol global et rhizosphérique d'oliveraies du Nord de l'Algérie.....	- 73 -
Introduction.....	- 73 -
1. Matériel et méthodes	- 74 -
1.1. Description des sites	- 74 -
1.2. Echantillonnage des sols et du végétal	- 75 -
1.3. Végétal.....	- 77 -
1.4. Analyse des sols et du végétal	- 77 -
1.5. Analyses statistiques.....	- 77 -
2. Résultats et discussion	- 78 -
2.1. Caractéristiques générales des vergers	- 78 -
2.1.1. Les sols.....	- 78 -
2.1.2. Etat nutritionnel des oliveraies étudiées.....	- 79 -
2.2. Effet rhizosphérique	- 80 -

Sommaire

2.3.	Distribution des formes biodisponibles du potassium.....	- 83 -
2.4.	Fixation du potassium dans la rhizosphère révélée par la diffraction des Rayons X.....	- 92 -
2.5.	Incidences sur les pratiques agricoles.....	- 95 -
3.	Conclusion	- 96 -
D-Diminution du potassium biodisponible à l'interface sol-racine de <i>Olea europea</i> L. avec l'application de doses croissantes d'engrais potassiques.		- 98 -
Introduction.....		- 98 -
1.	Matériel et méthodes	- 99 -
1.1.	Description du dispositif expérimental.....	- 99 -
1.2.	Echantillonnage des sols et du végétal	- 101 -
1.3.	Analyse du sol et du végétal.....	- 102 -
1.4.	Analyses statistiques.....	- 102 -
2.	Résultats et discussion	- 104 -
2.1.	Le sol naturel	- 104 -
2.2.	Statut nutritionnel des oliviers.....	- 104 -
2.3.	Effet de la fertilisation sur les propriétés chimiques et potassiques de la rhizosphère.....	- 106 -
2.3.1.	Augmentation du carbone et de la CEC dans les rhizoplans	- 106 -
2.3.2.	Accroissement du pH à l'interface sol racine	- 110 -
2.4.	Appauvrissement en potassium de la rhizosphère avec l'application d'engrais potassiques... -	113 -
2.4.1.	Potassium soluble et assimilable.....	- 113 -
2.4.2.	Diminution du taux de saturation en potassium dans la rhizosphère.....	- 117 -
3.	Mobilisation du potassium non échangeable dans la rhizosphère en relation avec le statut potassique du sol global.....	- 118 -
4.	Relations existant entre les propriétés des sols, les différents pools de potassium et le potassium foliaire -	122 -
5.	Dynamique des différentes formes de potassium dans la rhizosphère.....	- 123 -
6.	Pertinence agronomique de la localisation des engrais pour des oliveraies de montagne.....	- 125 -
7.	Analyse critique du dispositif expérimental.....	- 126 -
8.	Conclusion	- 126 -
E- Réponses de la minéralogie des argiles de la rhizosphère de <i>Olea europea</i> L. à l'apport croissant d'engrais potassiques.		- 128 -
Introduction.....		- 128 -
1.	Matériels et méthodes	- 129 -
1.1.	Analyse statistique.....	- 130 -
2.	Résultats et discussion	- 130 -
2.1.	Propriétés des diffractogrammes des argiles du sol naturel	- 130 -
2.1.1.	Identification des différents minéraux des argiles du sol global, du sol rhizosphérique et du rhizoplan du sol naturel.....	- 130 -

Sommaire

2.1.2.	Caractéristiques des diffractogrammes décomposés des argiles du sol naturel.....	- 131 -
2.2.	Influence de l'apport d'engrais potassiques sur la minéralogie des argiles des différentes fractions de sols	- 135 -
2.2.1.	Stockage du potassium dans les argiles du sol global.....	- 135 -
2.2.2.	Impact de la fertilisation sur le sol rhizosphérique et le rhizoplan	- 138 -
2.3.	Diminution du potassium non échangeable fixé dans la rhizosphère	- 145 -
2.4.	Relations entre les populations d'argiles et les propriétés chimiques des sols	- 148 -
2.5.	Biodisponibilité du potassium en relation avec les populations d'argiles.....	-150-
2.5.1.	Relations entre les formes biodisponibles du potassium et la minéralogie des argiles du sol rhizosphérique.....	-151-
2.5.2.	Relation entre les populations d'argile du sol global et celle du rhizoplan	- 151 -
3.	Conclusion	- 153 -
F- Distribution du potassium dans la rhizosphère en relation avec l'espèce : l'olivier (<i>Olea europea</i> L.) et le figuier (<i>Ficus carica</i> L.).....		
Introduction.....		
1.	Matériels et méthodes.	- 155 -
1.1.	Sites étudiés et échantillonnage des sols	- 155 -
1.2.	Quantification de la biomasse racinaire	- 155 -
1.3.	Analyse des sols	- 156 -
1.4.	Analyses statistiques.....	- 156 -
2.	Résultats et discussion	- 156 -
2.1.	Sols globaux	- 156 -
2.2.	Biomasse racinaire	- 157 -
2.3.	Changement des propriétés du sol dans la rhizosphère.....	- 159 -
2.4.	Effet de la rhizosphère sur la distribution du potassium	- 164 -
2.5.	Comparaison entre les deux espèces	- 168 -
3.	Conclusion	- 170 -
G-Impact de la racine sur la minéralogie des sols en relation avec l'espèce l'olivier (<i>Olea europea</i> L.) et le figuier (<i>Ficus carica</i> L.).....		
Introduction.....		
1.	Matériel et méthodes	- 173 -
1.1.	Sols des vergers	- 173 -
1.2.	Analyse des argiles	- 173 -
1.3.	Analyses statistiques.....	- 174 -
2.	Résultats et discussion	- 174 -
2.1.	Identification des différents minéraux.....	- 174 -
2.2.	Les argiles du sol sont-elles modifiées à proximité de la racine ?	- 175 -
2.3.	Effet des espèces sur la minéralogie des argiles.....	- 179 -

Sommaire

2.4. Relations entre les propriétés des sols et les populations d'argiles	- 186 -
3. Conclusion	- 190 -
H-Conclusion générale	-192-
Références bibliographiques	-198-
Abréviations	-212-
Tableaux	-213-
Figures	-216-

Erreur ! Signet non défini.

Introduction générale

L'olivier (*Olea europea* L.) occupe une place fondamentale dans l'alimentation humaine de par le produit qu'il fournit : l'huile d'olive. L'olivier est l'une des espèces fruitières qui connaît un regain d'intérêt en Algérie, comme en témoigne la multitude de vergers plantés ces dernières années, en particulier dans le cadre de la valorisation des terres situées dans les régions semi arides et arides de l'Algérie. Traditionnellement, l'olivier est cultivé dans les zones marginales, sans irrigation, malgré que les pluies, souvent, ne satisfassent pas à la demande de l'évapotranspiration (Fernandez et Moreno, 1999). C'est le cas en Kabylie, l'olivier occupe souvent des sols à fortes contraintes (fortes pentes, déficience en nutriments).

Le potassium est l'un des éléments vitaux de la nutrition humaine et animale. Il provient essentiellement des cultures qui le prélèvent des sols. Pettigrew (2007) soulignent le rôle d'une fourniture adéquate en potassium sur l'amélioration des rendements et sur la qualité des cultures. Les conséquences de carence en potassium des cultures sont bien connues : chute du rendement, du taux de sucre, du rendement en huile, de la résistance au stress hydrique, augmentation de la sensibilité aux ravageurs. Ces propriétés du potassium sur la plante (fruit de meilleur calibre, résistance aux maladies et à la sécheresse) correspondent aux problèmes actuels et futurs de l'agriculture (rendement, manque d'eau et maladies). Ce nutriment est vital sous climat méditerranéen, il induit une résistance des plantes au stress hydrique, ce dernier entraînant un accroissement des besoins des cultures en cet élément (Cakmak, 2007,2010). Le potassium, élément nutritif exporté en fortes quantités par l'olive (Martinez et Sanchez, 1975), joue un rôle important sur la croissance, le rendement en huile d'olive et la résistance aux parasites de l'arbre (Argenson et al., 1999). La déficience en potassium a été décrite par Restrepo-Diaz et al., (2008 a) comme l'un des facteurs limitant de la production oléicole même lorsque les vergers sont cultivés sur des sols suffisamment pourvus en potassium.

Ces 50 dernières années, la population humaine mondiale et la consommation d'engrais n'ont cessé d'augmenter. A l'instar du phosphore, le potassium est apporté au sol sous forme d'engrais, lesquels proviennent de l'extraction de ces deux éléments à partir de gisements. Au vu des enjeux autour du potassium, rôle sur la santé humaine, nutriment majeur du rendement, il est surprenant que cet élément soit si peu étudié. En effet, les recherches en agronomie se sont principalement focalisées sur l'azote suivi de près par le phosphore en

raison de leur impact sur l'environnement (pollution des nappes par les nitrates et eutrophisation des lacs). Cet intérêt s'explique aussi pour le phosphore par le caractère fini de cette ressource (gisement) mais aussi par le fait que seuls quelques pays dans le monde détiennent les principaux gisements. Cette limitation de la disponibilité des engrais phosphatés ne concerne pas l'Algérie, tout au moins dans un proche avenir. En effet, le pays recèle des ressources en phosphates importantes qui permettent de satisfaire les besoins de l'agriculture et l'exportation d'une quantité appréciable (FAO, 2005). S'agissant de l'azote les ressources en gaz de l'Algérie assurent la couverture de la totalité des besoins et la possibilité d'exporter des engrais azotés (FAO, 2005). Ce qui n'est pas le cas pour les engrais potassiques. L'Algérie fait partie des pays qui importent les engrais potassiques. La demande en engrais potassiques est presque universelle mais sa production est limitée à une poignée de pays. Les ressources sont très importantes, mais elles sont concentrées dans quelques lieux privilégiés du globe, principalement au Canada, en Russie et en Biélorussie (Tournis et Rabinovitch 2010). L'envolée des prix des engrais potassiques ces dernières années limite la fertilisation potassique dans les pays émergents.

L'agriculture est face à un défi majeur : nourrir une population de plus en plus importante avec des surfaces arables qui stagnent associées à une raréfaction des intrants en raison de leur coût de plus en plus élevé. Un nouveau concept émerge en remplacement de celui de l'intensification chimique d'une agriculture productiviste (engrais et pesticides) c'est celui de l'intensification écologique. 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 racines des plantes prélèvent le potassium du sol à leur proximité immédiate, zone de sol appelée rhizosphère. La rhizosphère est le 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). Ce volume de sol est réduit, mais constitue un important sous système de la pédosphère (Shi et al., 2004), mais aussi un compartiment fondamental des écosystèmes terrestres en raison de son influence majeure 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 survie, par une influence bénéfique sur les cycles biogéochimiques des nutriments (Dinesh et al., 2010), ceci est d'autant plus vrai dans un milieu méditerranéen à fortes contraintes. Divers auteurs, les uns pour des écosystèmes

forestiers souvent déficients en nutriments (Gobran et Clegg 1996 ; Gobran et al., 1998 ; Wang et Zabowsky 1998; Chiu et al., 2002 ;Turpault et al., 2005, 2007 ; Calvaruso et al., 2011) d'autres pour des agro systèmes comme le maïs (Vincenzo et al., 2003), les céréales et légumes (Bagayoko et al., 2000), le thé (Chen et al., 2006 ; Zhu et al., 2006) ont montré que la racine pouvait créer un microenvironnement propice à la fois au développement des racines et à celui des microorganismes.

C'est l'activité de la racine et les microorganismes qui lui sont associés qui sont à l'origine de modifications des propriétés physiques comme la densité et la porosité (Hinsinger et al., 2005 ; Gregory 2006), biochimiques (Stengel et Gelin, 1998; Römheld et Neumann, 2006) et minéralogiques (April et Keller 1990; Calvaruso et al., 2007 ; Turpault et al., 2008,2009) des sols à proximité immédiate des racines actives. Dans la rhizosphère, la libération de composés organiques par la racine stimule les microorganismes lesquels en retour favorisent la biodisponibilité des éléments nutritifs et leur prélèvement par la plante (Marschner, 1995; Grayston et al., 1996). La nature et l'intensité du changement des concentrations ioniques au voisinage de la racine dépendent aussi de la correspondance entre la demande des plantes et la fourniture du sol (Hinsinger, 1998). Localement, dans la rhizosphère, les racines et les micro-organismes sont ainsi capables d'induire la dissolution de minéraux peu solubles ou la désorption d'ions chimisorbés et de mobiliser des quantités de potassium considérées comme peu disponibles sur la base de seuls critères chimiques (Arvieu 1998). Un des leviers de l'intensification écologique consiste en l'utilisation des processus rhizosphériques (physiques, chimiques et biologiques) opérant à l'interface sol/racine pour améliorer la biodisponibilité des éléments nutritifs).

De nombreuses études menées sur l'olivier ont été consacrées à l'effet du stress hydrique (Benlloch-Gonzalez et al., 2008 ; Palese et al., 2010), de la fertilisation (López-Granados et al., 2004 ; Restrepo-Diaz et al., 2008 ; 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. Il est intéressant de noter que Gálvez et al., (2004) ont montré que les paramètres qui mesurent la vigueur de l'olivier à savoir le volume de la canopée et le diamètre de l'arbre présentaient des corrélations hautement significatives avec les paramètres du sol tels le potassium assimilable, la CEC et la matière organique de la zone racinaire.Ce qui justifierait des études sur l'impact de la racine de l'olivier sur le sol à son voisinage. Se pourrait-il qu'il y ait création d'îlots de fertilité à proximité immédiate de la racine de l'olivier dans des sols à fortes contraintes?

Dans ce contexte, l'objectif général de l'étude est de préciser la biodisponibilité du potassium dans la rhizosphère de l'olivier. Pour ce faire, il s'agira de comparer les propriétés chimiques, les formes biodisponibles du potassium, la minéralogie de la fraction argileuse du sol global à celles de l'interface sol/racine. Nous avons testés les hypothèses de travail suivantes : i) l'activité de la racine de l'olivier améliore la biodisponibilité du potassium principalement par la modification de certaines propriétés du sol et de sa minéralogie à proximité immédiate de la racine ii) l'association fertilisation potassique et activité de la racine modifie le sol à proximité de la racine et iii) la racine de l'olivier et du figuier impacte différemment la rhizosphère.

La première partie de la thèse est une synthèse bibliographique qui établit une synthèse sur les connaissances de la biodisponibilité du potassium dans les sols, de sa modification dans la rhizosphère ainsi que celle de certaines propriétés de sol liées au déterminisme de la biodisponibilité des éléments nutritifs et du potassium en particulier la minéralogie de la fraction inférieure à 2μ . Enfin l'objectif, les hypothèses de travail et la démarche adoptée pour apporter des éléments de réponses aux hypothèses sont précisés dans ce chapitre. Dans la suite du manuscrit de cette thèse nous présentons le matériel et les analyses utilisées dans cette étude.

Les résultats obtenus et leur interprétation font l'objet de cinq chapitres. Une conclusion générale synthétisant le travail avec la proposition de perspectives vient clore cette étude.

A-Synthèse bibliographique

1. Potassium dans les sols

1.1. Généralités sur le potassium

Il est l'un des éléments les plus abondants de la croûte terrestre, il y atteint une concentration moyenne de 2.1 à 2.5% (Baize, 2000). Il présente un comportement étroitement lié à la minéralogie du sol car c'est un important constituant de nombreux minéraux primaires potassiques (Quemener, 1986). Le potassium est l'un des trois principaux éléments nutritifs des cultures (Bukman et al., 1990). Il est absorbé en quantités relativement importantes par les végétaux (Robert, 1996) dans lesquels il est présent sous forme d'ions K^+ , très mobile, dissous dans les tissus intracellulaires, notamment dans la vacuole, où il s'accumule à des concentrations jusqu'à cent fois supérieures à celle du cytoplasme (Heller et al., 1998).

1.2. Formes du potassium dans le sol

Le potassium dans les sols provient des minéraux silicatés ; les feldspaths potassiques (14 % de potassium libérable), les micas (6 à 10% de potassium), l'illite (3 - 8% de potassium), la vermiculite (<2% de potassium), la smectite (< 0.5% de potassium) et de la matière organique dont la teneur en K varie selon sa nature (Quemener 1979). Ce potassium, peu lié à la matière végétale, est considéré comme directement accessible aux plantes. Il est libéré des complexes organiques par des réactions d'échange ou par minéralisation de la matière organique (Morel, 1989). Le potassium du sol provient de l'altération des minéraux du sol, de la décomposition de la matière organique et des engrais.

La biodisponibilité du potassium dans les sols, est actuellement expliquée par le concept se basant sur l'existence de quatre pools de potassium qui se distinguent par leur accessibilité aux racines, avec des transferts réversibles entre les pools (Figure 1). On admet que le potassium soluble est principalement à l'état de cation K^+ libres. Malgré sa faible teneur, inférieure à 10 ppm, qui ne représente que 0,5 à 7,8% du potassium assimilable (Barber, 1995), cette forme est considérée comme la source première de potassium absorbée par les racines. Ce pool immédiatement disponible est réapprovisionné aussi bien par le potassium échangeable que le potassium non échangeable du sol (Römheld et Kirkby, 2010). La concentration de la solution du sol en potassium varie selon la nature des minéraux et leur

degré d'altération (Calvet, 2003), elle diminue sous l'action des pluies, des mouvements de l'eau en profondeur dans les profils (Johansson, 1992) et du prélèvement racinaire. Le potassium échangeable comprend principalement le potassium adsorbé sur les sites planaires, le potassium inter foliaire des argiles expansibles et une partie du potassium des coins de serrage (edges sites) (Goulding, 1983).

Le potassium non échangeable qui est constitué par le potassium inter foliaire des argiles non expansibles comme les illites, les micas aussi bien qu'une partie du potassium des feldspaths peut contribuer de manière significative à la nutrition des plantes dès lors que le potassium assimilable devient insuffisant (Memon et al., 1988; Badraoui et al., 1992 ; Mengel et Uhlenbecker, 1993). Cette fraction est qualifiée de non échangeable car les cations potassium ne sont pas échangés par d'autres cations sur de courtes durées (Calvet, 2003).

Le dernier pool est le potassium de réserve qui est constitué par le potassium des minéraux silicatés potassiques.

1.3. Dynamique du potassium dans le sol

Dans le sol, le comportement du potassium est régi par les équilibres existant entre ses différentes formes. Les conditions d'approvisionnement du végétal sont contrôlées par les équilibres complexe adsorbant-solution du sol, potassium non échangeable-potassium du complexe adsorbant (Robert, 1992). Le pouvoir d'un sol à maintenir le niveau du potassium dans la solution du sol est défini comme le pouvoir tampon du sol (Pal et Durge, 1989). Acquaye, (1973) définit le pouvoir tampon comme étant le transfert entre les formes de potassium dans le sol. Dans le sol au repos, ces formes sont en équilibre entre elles, mais il existe entre chaque phase des relations plus ou moins réversibles qui vont intervenir dès l'instant où l'on va modifier les quantités d'une ou plusieurs formes, par un apport d'engrais, ou par les prélèvements racinaires (Bosc, 1988). Un ensemble de réactions se produit alors, impliquant un déplacement de l'équilibre initial.

Après une fertilisation, la teneur en potassium de la solution augmente, un équilibre s'établit rapidement entre la forme soluble et la forme échangeable, mais une partie du potassium subira une fixation pour augmenter la teneur en K de réserve (Quemener, 1986). Lors d'un prélèvement racinaire, si la concentration en potassium en solution venait à diminuer à un niveau critique, il se produira une libération du potassium non échangeable des positions inter foliaires des minéraux pour compenser les quantités perdues (Hinsinger, 1998). De nombreuses expériences ont montré que le pouvoir tampon est en relation avec le rapport

entre le potassium échangeable et la capacité d'échange cationique (K/CEC) (Addiscott, 1970). Quand le pouvoir tampon diminue, le rapport K/CEC dénommé taux de saturation en potassium augmente.

1.4. Fixation et libération du potassium

En plus de son adsorption sur les sites d'échanges du complexe adsorbant, le potassium de la solution du sol est soumis à un autre phénomène qui est la fixation qui se traduit par son piégeage à l'intérieur des feuillets d'argile. Le phénomène inverse (libération) a lieu lorsque le milieu externe s'appauvrit en potassium (Morel, 1989). L'intensité de la fixation paraît relever de plusieurs facteurs dont, entre autres : les alternances dessiccation-humectation qui favorisent des réorganisations structurales avec fixation de potassium (Robert et al., 1988) ; de la quantité et la nature des argiles, de la charge totale du feuillet, de sa densité et de sa localisation (Goulding, 1987). Ainsi la dynamique du potassium dans les sols est intimement liée à la nature et à la quantité des argiles dans les sols.

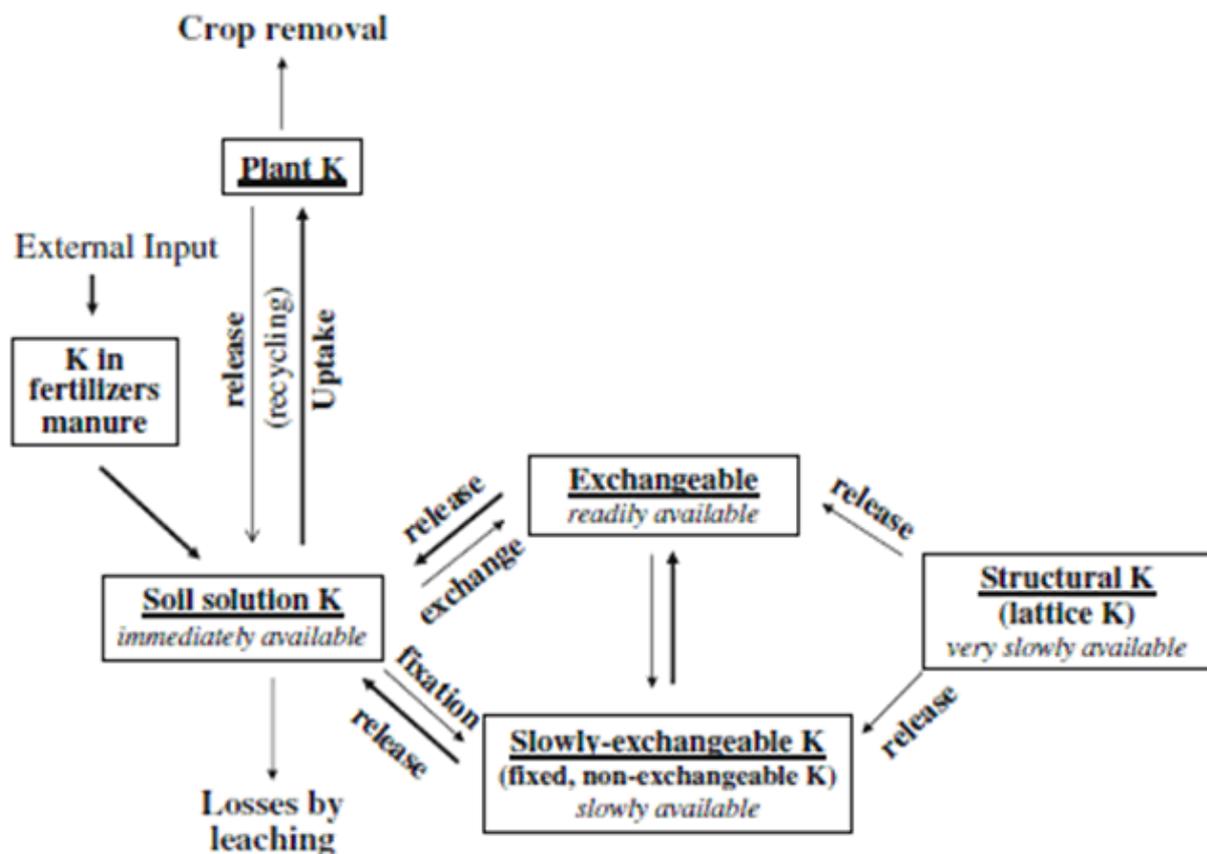


Figure 1 Cycle du potassium dans les sols (Syers 2003 in Römheld et Kirkby 2010)

2. Argiles dans les sols

Les définitions et la classification des argiles du sol sont basées sur l'ouvrage de Caillère et al., (1982). Les minéraux argileux sont constitués d'un empilement de feuillets de structure bien définie, séparés par des intervalles désignés sous le nom d'espaces interfoliaires. Chacun de ces feuillets est lui-même divisé en 2 ou 3 couches. La couche tétraédrique est constituée de tétraèdres d'oxygène dont le centre est occupé par du silicium Si^{4+} . La couche octaédrique est constituée d'octaèdres d'oxygène dont le centre est généralement occupé par de l'aluminium, Al^{3+} .

La substitution de l'ion silicium de la couche tétraédrique par de l'aluminium et/ou la substitution de l'aluminium de la couche octaédrique par un di ou monovalent (Fe^{2+} , Mg^{2+} , Li^+) crée un excès de charges négatives (ou déficit de charges positives) qui est neutralisé par des cations qui viennent s'adsorber sur les argiles ou occupés l'espace interfoliaire. Cette charge est appelée charge permanente des argiles. Elle est maximale pour les micas et nulle pour la kaolinite. Cette charge est en partie à l'origine de la capacité d'échange cationique des sols.

2.1. Principaux types de minéraux argileux dans les sols

Selon le nombre de couches tétraédriques (T) et couches octaédriques (O), on distingue trois types de minéraux :

- Les minéraux de type 1/1 (ou T-O) à une couche d'octaèdres et une couche de tétraèdres. L'équidistance caractéristique est d'environ 0,71nm. A ce type d'argile correspond le groupe de la kaolinite.
- Les minéraux de type 2/1 (ou T-O-T) à une couche d'octaèdres encadrée par deux couches tétraédriques. L'équidistance varie de 0,94nm à 1,8nm selon le contenu de l'inter feuillet. A ce type d'argile correspondent les groupes, des smectites, des vermiculites et celui des micas.
- Les minéraux de type 2/1/1 (ou T-O-T-O) à une couche d'octaèdres encadrée par deux couches tétraédriques et un inter feuillet constitué par une couche d'octaèdres. L'équidistance caractéristique est alors d'environ 1,4nm : à ce type d'argile correspond le groupe des chlorites.

2.2. Argiles et le potassium dans les sols

Certains minéraux sont connus comme pouvant seulement libérer du potassium (muscovite, biotite, phlogopite), d'autres adsorber et libérer (montmorillonite vraie ne contenant pas de feuillets de mica), d'autres enfin, peuvent fixer et libérer (illites) (Schuffellen et Van der Marel 1955, Goulding 1987). La fixation par les illites serait due à la structure en biseau des bordures des cristaux, parties appauvries en potassium par les cultures et qui présentent une forte sélectivité vis-à-vis du potassium (Beckett, 1980, Quemener, 1986).

La fixation dans des sols riches en illites provoque la fermeture des feuillets et contribue à recréer des zones d'illites pures (Dufey et Lambert, 1987). La taille des particules argileuses intervient dans la fixation du potassium. En effet, Badraoui et al., (1992) indiquent que c'est la fraction la plus fine des argiles qui fixe plus de potassium comparativement à la fraction argileuse à granulométrie plus élevée.

Diverses études ont montré des relations étroites entre les pools de potassium et la minéralogie des sols. Surapaneni et al., (2002) ; Officer et al., (2006) déterminent des relations entre le potassium non échangeable et les types de minéraux argileux. Barrè et al., (2008) ont déterminé une corrélation très hautement significative entre l'abscisse du centre de gravité (paramètre calculé sur la base la décomposition de diffractogrammes de Rayons X des argiles du sol) et le potassium total dosé par fluorescence. Sharma et al., (2010) déterminent la teneur en potassium non échangeable la plus élevée sur les sols les plus riches en illite. Gosh et Singh (2001) montrent que des sols riches en kaolinite libèrent moins de potassium extractible à l'acétate d'ammonium comparativement à des sols riches en illite et en interstratifiés illite/smectite. Confronter des données des différents pools bios disponibles du potassium dans les sols à la minéralogie des argiles s'avère très utile pour comprendre le taux de libération du K dans les sols.

3. Rôles et importance du potassium dans la plante

Le potassium est l'un des principaux constituants minéral de la matière sèche végétale et en représente approximativement 3% (Yara, 2009). Le potassium intervient dans la

synthèse des protéines et dans l'activation des enzymes (Wild, 1988). Il joue un rôle important dans la dynamique de l'eau dans le végétal par la création de forces osmotiques grâce auxquelles l'eau est absorbée par les racines (Heller et al., 1998). Le potassium contrôle l'évapotranspiration par la fermeture et l'ouverture des stomates (Morel, 1989). Ainsi, le potassium limite la transpiration, augmente la résistance à la sécheresse et améliore la rigidité des tissus et réalise aussi une économie en eau (Yara, 2009). L'influence de ce phénomène sur l'utilisation de l'eau est donc d'une spécificité importante dans les régions arides où l'eau est le facteur limitant des cultures (Robert, 1992).

A côté de ces multiples fonctions, le potassium permet également une meilleure résistance aux maladies cryptogamiques (Shyam et al., 1982 ; Pousset, 2000).

<u>Echelle concernée par la carence</u>	<u>Conséquences</u>	<u>Interactions avec facteurs biotiques et abiotiques</u>
Cellulaire	▲teneurs en sucres solubles ▼teneurs en eau▼turgescence ▼ajustement stomatique ▼élasticité pariétale, ▼vitesse d'expansion cellulaire	Infections Attaques parasitaires Maladies X Stress Sécheresse, Chaleur excessive, Gel, Carence minérales
Plante/organes	▼Surface, durée de vie foliaire, ▼assimilation▼rythme dvpt, ▼assimilation NO ₃ ⁻	
Culture	▼Indice foliaire ▼Racines primaires, ▼Poils adsorbants ▼Production et allocation C	
Récolte	▼Rdt, ▼% fibre, huile, sucres ▼Indice récolte	

Figure 2 Conséquences d'une carence en potassium à différentes échelles et interactions connues avec des stress biotiques et abiotiques (Jordan Meille, 2011)

4. Interface Sol / Racine: la rhizosphère

4.1. Concept de la rhizosphère

Le terme rhizosphère a été introduit en 1904 par Lorenz Hiltner (Hinsinger, 1998; Hinsinger et al., 2005). « Rhizo » vient du grec « Rhiza » signifiant racine, « Sphère » vient du latin « Sfaira » (signifiant balle, ballon ou globe). La sphère définit le champ d'influence du système racinaire (Figure 3). Les racines (Watt et al., 2005), le chevelu racinaire et les poils adsorbants sont en contact intime avec les particules du sol (Mc Cully, 1995) (Figure 4).

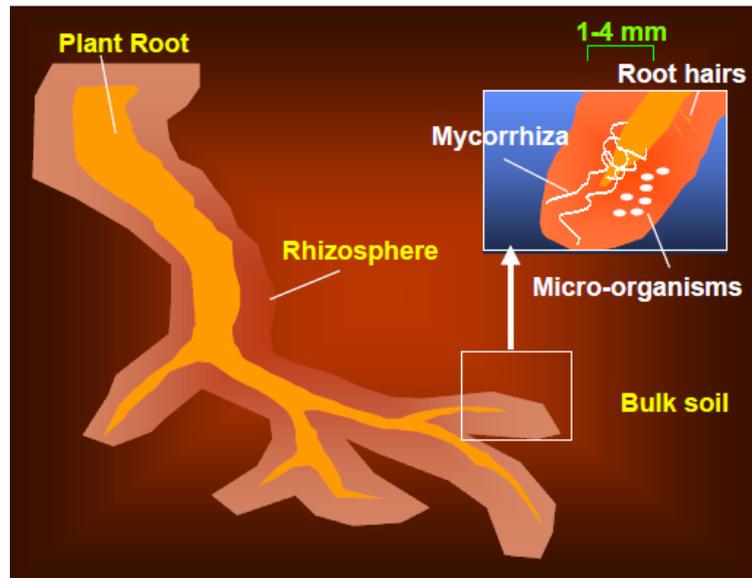
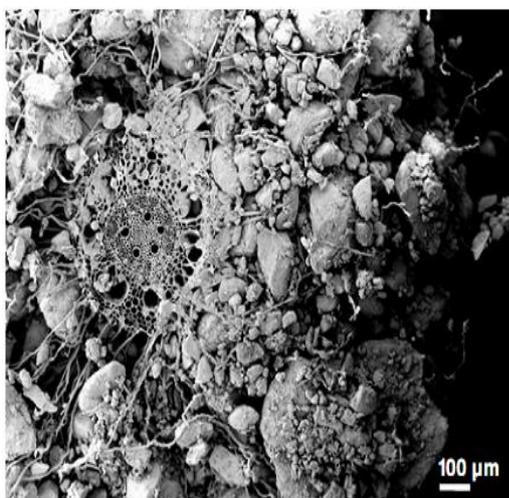


Figure 3 Principaux composants de la rhizosphère (d'après Wenzel et Fitz, 2005)

Le terme rhizosphère désigne la mince couche de sol qui entoure les racines absorbantes et dont la composition est profondément modifiée par l'activité et le métabolisme de la racine (Schröder et Hartmann, 2003). Elle diffère de la masse du sol par son pH, son potentiel d'oxydoréduction, par l'abondance et la composition de la matière organique et enfin par sa forte activité biologique qui se traduit par une teneur élevée en CO₂ (Darrah, 1993). Ainsi, malgré le petit volume qu'occupe la rhizosphère dans le sol, elle joue un rôle central dans le maintien du système sol-plante (Gobran et al., 1998).

A



B

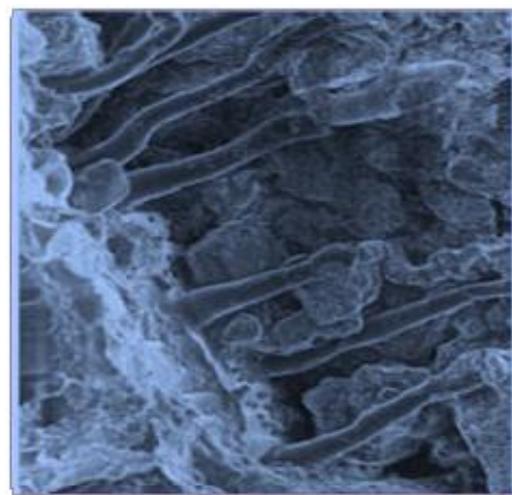


Figure 4 Rhizoplan entourant une racine d'orge cultivée au champ, on note le développement du chevelu racinaire dans les macropores et son rôle dans l'agrégation du sol A (Hinsinger et al., 2009). Interface racines-sol de la digitale (*Digitaria sanguinalis*), les poils absorbants sont clairement visibles en contact intime avec les particules de sols B (Mc Cully, 1995)

4.2. Extension spatiale de la rhizosphère

L'extension spatiale de la rhizosphère dépend des interactions sol-racine (Darrah, 1993). La rhizosphère subit une évolution spatio-temporelle (Figure 5 et Figure 6) en fonction de la croissance, de l'activité des racines (Turpault et al., 2005) et de la nature des plantes. Ceci est partiellement lié à la variation des stratégies de certaines espèces à étendre leur rhizosphère à travers le développement du chevelu racinaire (Hinsinger et Gregory, 1998). Quand les racines sont denses, une grande fraction du sol est directement influencée par les exsudats racinaires (De Neergaard et Magid, 2001). La rhizosphère est un concept à géométrie variable, la distance sur laquelle une racine extrait un élément nutritif dépend du taux d'humidité du sol et de la mobilité de cet élément dans ce milieu (Hinsinger, 2009). Elle est d'une fraction de millimètre si l'on considère le transfert d'éléments peu mobiles tels que le phosphore et le potassium, limitée souvent à moins d'un millimètre (Calvet, 2003) et peut atteindre plusieurs centimètres dans le cas de l'eau et des éléments mobiles tels que les nitrates (Darrah, 1993; Hinsinger, 2001).

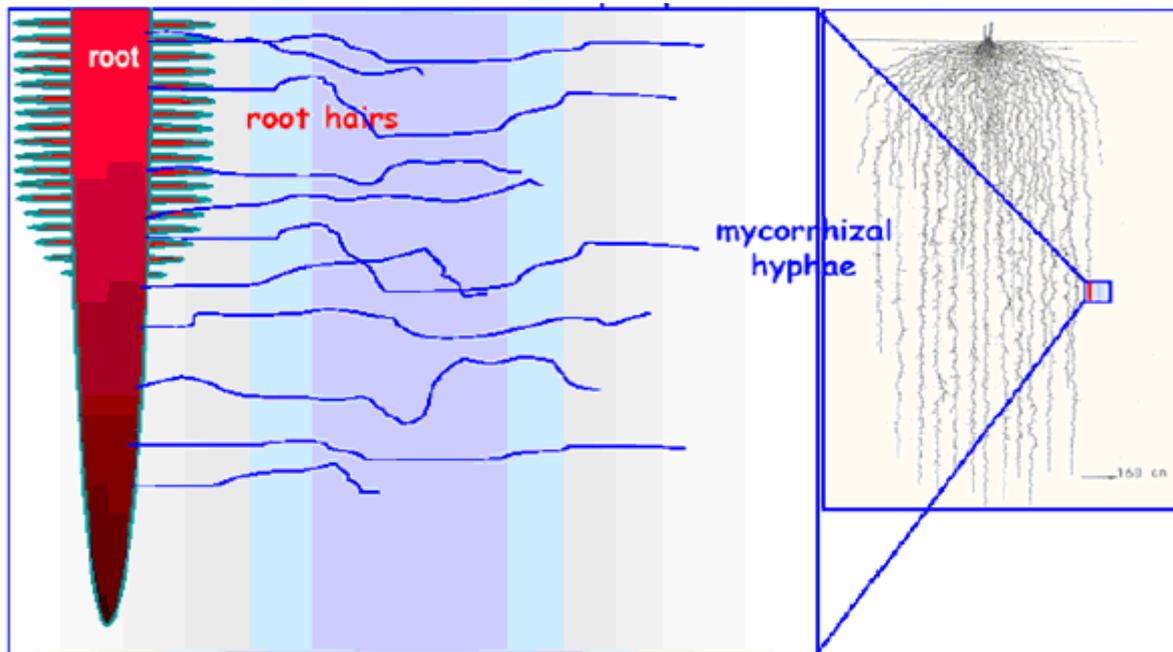


Figure 5 Géométrie et extension spatiale de la rhizosphère (Wenzel et Fitz, 2005).

L'efficacité du système racinaire à explorer le sol pour l'absorption des nutriments et de l'eau est plus importante lorsque les plantes présentent des symbioses avec des champignons sous forme ecto- et endomycorhizes (Figure 5) (Schröder et Hartmann, 2003).

En effet, ces plantes voient leur rhizosphère augmenter grâce aux hyphes du mycélium qui exploitent un plus grand volume de sol à plusieurs centimètres de la racine (Figure 5).

4.3.Fonctions de la rhizosphère

4.3.1.La rhizodéposition et l'effet rhizosphérique

Hinsinger et al., (2005) définissent l'effet rhizosphérique comme étant toute modification des caractéristiques physiques, chimiques, biochimiques du sol provoquée par la racine. Ils expliquent ce phénomène par le fait de prélèvements racinaires d'eau et d'éléments minéraux, mais surtout par la libération des composés organiques (Marschner, 1995 ; Gregory, 2006 ; Jones et al., 2009 ; Nguyen, 2009). Ce processus est défini comme la rhizodéposition (Alexis 1988, Nguyen, 2009). La rhizodéposition (Figure 6) consiste en l'accumulation des substances organiques et minérales émises par la partie active des racelles.

Les rhizodépôts sont constitués majoritairement de composés carbonés mais également, en quantité moins importante, de composés azotés (Rovira, 1969). Il est désormais admis qu'en moyenne 20% du carbone assimilé (Hinsinger et al., 2005), 40% ou plus 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. Chez les céréales, entre 20 et 30% de la fraction de carbone total assimilé sont transférés aux racines alors que chez les espèces prairiales elle atteint 30 à 40% (Kuzyakov et Domanski, 2000).

Les flux de rhizodéposition sont plus importants chez les plantes pérennes que chez les plantes annuelles (jusqu'à 40% du carbone assimilé chez les plantes annuelles et jusqu'à 70% chez les plantes pérennes) (Bazot, 2005). Les rhizodépôts représentent une source d'énergie et d'éléments nutritifs qui stimule la croissance des communautés microbiennes hétérotrophes (Valé et al., 2005, Gregory, 2006, Nguyen, 2009). Celles-ci vont être sensiblement plus denses que celles du sol indemne d'activité racinaire (Darrah 1993 ; Nguyen et Henry 2002 ; Dinesh et al., 2010). Grayston et al., (1996) décrivent la rhizodéposition comme la totalité du carbone entrant dans le sol via la racine. La rhizodéposition est composée de différents constituants qui se distinguent par leur composition et leur mode de libération :

- Les exsudats : par exsudation, on désigne le processus qui aboutit à la libération par les racines des plantes de substances organiques ou minérales. Les plantes exsudent divers

composés organiques dont la composition et la quantité change selon l'espèce végétale (Turpault et al., 2005). Ils forment la part dominante de la rhizodéposition. Ce sont de petites molécules solubles dans l'eau ou volatiles libérées selon des mécanismes passifs par les cellules vivantes, ces molécules sont variées ; hydrates de carbone, acides aminés, acides gras, vitamines, enzymes (Gobat et al., 1998).

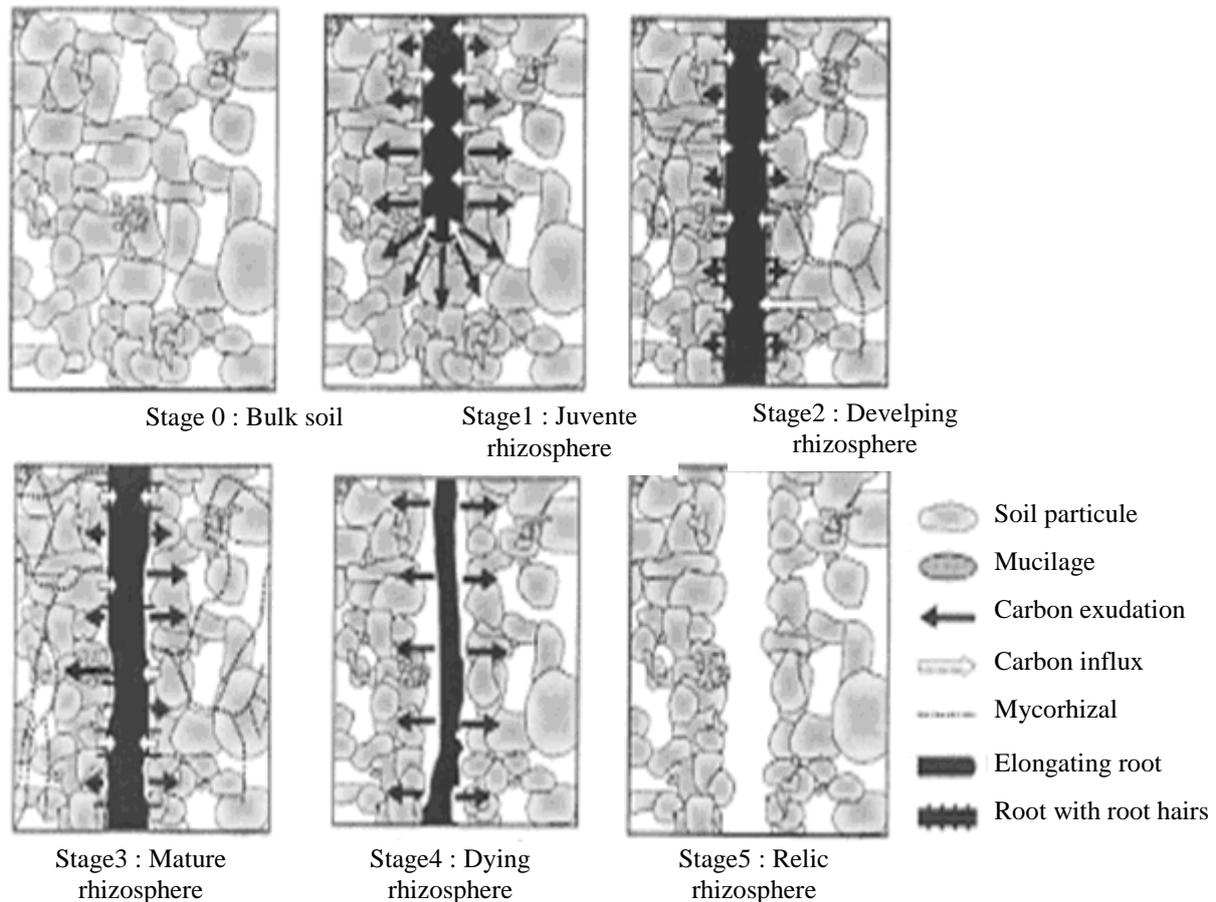


Figure 6 Représentation schématique des différents stades de développement de la rhizosphère d'une plante mycorhizée (par exemple une céréale). Le stade 0 correspond au sol avant l'arrivée de la racine. Le stade 1 représente l'arrivée de la racine au cours duquel l'exsudation de composés de carbone solubles et insolubles (mucilage) est plus importante comparée à l'influx (absorption des exsudats par la racine et rétention par les sols). L'exsudation est maximale à la pointe de la racine et diminue graduellement le long de la racine. Une compression physique du sol se produit autour de la racine. Le stade 2 représente le développement de la rhizosphère au cours duquel le chevelu racinaire est en expansion et l'infection mycorhizienne apparaît. Le taux d'exsudation diminue et l'influx de carbone à partir du sol survient (amino-acides) aussi bien que l'absorption d'exsudats par la racine. Le stade 3 représente une rhizosphère plus âgée où la mort des cellules épidermiques, corticales et du chevelu racinaire débute. L'infection mycorhizienne est bien développée. Le stade 4 représente une rhizosphère desséchée où la mort des cellules corticales et des hyphes mycorhiziens a commencé. L'influx de carbone a beaucoup diminué. Le stade 5 représente une rhizosphère relique où la racine est complètement décomposée formant ainsi un canal dans le sol. Durant les stades de 0 à 5 la population microbienne s'est développée avec un pic au stade 3 et a diminué graduellement jusqu'au stade 5 (Jones et al., 2004)

-Les lysats : ils proviennent de l'autolyse par dégénérescence des poils absorbants, des parois cellulaires, des cellules épidermiques et corticales, et des racines entières (Robert et Trocmé, 1979). Ils représentent un apport très important de matière organique (Gobat et al., 1998).

- Le mucilage : le mucilage qui couvre les racines de nombreuses plantes est un matériel gélatineux formé de polysaccharides, d'ectoenzymes et autres protéines qui sont les principaux exsudats racinaires de poids moléculaires élevés (Watt et al., 1993 ; Marschner, 1995). Cette sécrétion de suc racinaire est particulièrement active dans la zone subapicale au voisinage de la coiffe. Le mucilage est sécrété par les cellules des racines en croissance et est responsable de l'altération des minéraux du sol entourant les racines (Mc Cully, 1995). Le mucilage d'origine bactérienne et végétale est en mesure de lier les particules du sol à la dessiccation et à retenir les particules lors de ré-humidifications ultérieures et aide les racines dans leur pénétration dans le sol (Stengel et Gelin, 1998). Alami et al., (2002) précisent que les bactéries qui nichent dans la rhizosphère transforment une partie des exsudats racinaires en exo polysaccharides qui provoquent une agrégation des particules argileuses. Il favorise ainsi la stabilité des concentrations argileuses le long des chenaux racinaires et constitue en quelque sorte une protection de la racine contre le dessèchement excessif du sol (Callot et al., 1982).

- L'absorption de l'eau par la plante compense la transpiration. Il en résulte un drainage de l'eau du sol. Le mucilage en maintenant une humidité dans la rhizosphère évite ainsi les vides qui isoleraient du sol les surfaces d'absorption des racines (Gobat et al., 2010).

La rhizodéposition représente une perte d'énergie pour la plante mais un apport trophique pour les micro-organismes telluriques, en échange de cet apport d'énergie les micro-organismes peuvent rendre disponibles pour la plante des nutriments nécessaires à sa croissance (Bazot, 2005).

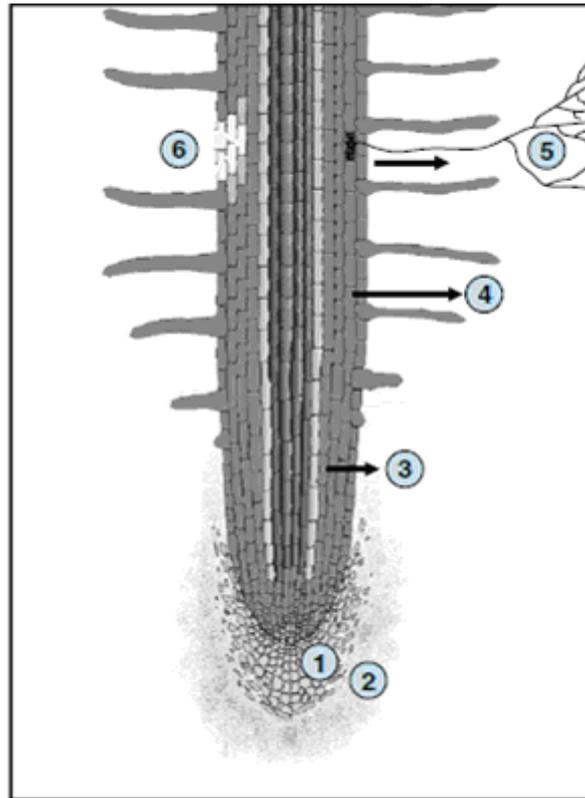


Figure 7 Représentation schématique d'une coupe longitudinale d'une racine en croissance montrant les principales sources de la rhizodéposition : 1 perte de la coiffe de la racine et des parois cellulaires, 2 émission de mucilage insoluble, 3 émission d'exsudats racinaires solubles, 4 émission de composés carbonés organiques volatils, 5 perte de C à partir de symbiotes (mycorhizes à arbuscules, par exemple) et 6 pertes de carbone à cause de la mort et la lyse des cellules de l'épiderme et du cortex racinaire (Jones et al., 2009).

4.4. Principaux changements dans la rhizosphère

Les plantes ont une action directe sur les microorganismes et sur les propriétés du sol de par les substances diverses qu'elles apportent dans ce milieu, principalement au niveau de la rhizosphère. De nombreux travaux de recherche ont mis en évidence que la racine pouvait elle-même modifier profondément, outre son environnement microbologique, les conditions physiques et chimiques du sol qui l'entoure (Gobran et Clegg, 1996 ; Hinsinger et al., 2001). La rhizosphère peut montrer des différences significatives comparativement au sol indemne d'activité racinaire ; flux d'eau vers les racines, accumulation ou épuisement des nutriments, libération des composés organiques, processus mécaniques que subissent les agrégats du sol et la considérable densité microbienne qui changent les propriétés physiques, chimiques et biologiques de l'environnement racinaire (Sorensen, 1997; Courchesne et al., 2001, Watteau et al., 2006). La magnitude des changements dans la rhizosphère dépend non seulement des facteurs édaphiques et climatiques mais aussi de l'activité des racines et des microorganismes qui lui sont associés lesquels apparaissent comme reliés à l'espèce d'arbre, à son génotype et à

la fertilité des sols (Barber, 1974; Violante et al., 1998 ; Chen et al., 2002 ; Vincenzo et al., 2003).

4.4.1.Changement des propriétés biologiques

Les rhizodépôts représentent une source d'énergie et d'éléments nutritifs qui stimulent la croissance des communautés microbiennes hétérotrophes (Stengel et Gelin 1998 ; Gregory 2006, Nguyen 2009). Celles-ci vont être sensiblement plus denses que celles du sol indemne d'activité racinaire (Darrah 1993 ; Arocena et Glowa, 2000 ; Nguyen et Henry 2002). Leur nombre diminue au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la racine (Davet, 1996). La nature et la quantité des rhizodépôts interviennent dans la composition de la communauté microbienne. La diversité microbienne diminue lorsque l'on se rapproche de la racine (Gobat et al., 2010). Les communautés microbiennes présentent une influence principale dans la régulation de la dynamique de la décomposition de la matière organique et de la disponibilité des éléments minéraux pour les plantes (Grégory, 2006). Les exsudats racinaires vont intervenir sur différents processus dans la rhizosphère (Figure 8).

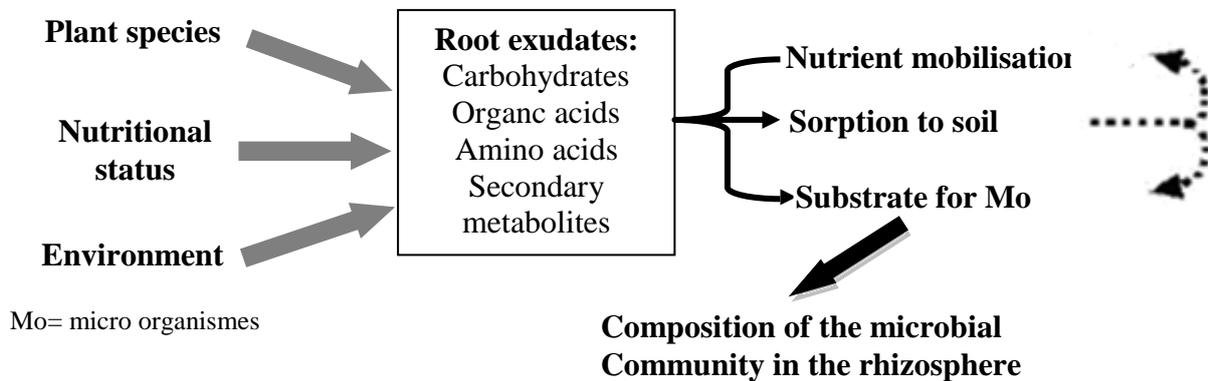


Figure 8 Rôle des exsudats dans les processus rhizosphériques (Marschner et Rengel, 2007)

4.4.2.Changement des propriétés physiques

La rhizosphère est le lieu privilégié de la structuration et de l'organisation de la porosité du sol à toutes échelles (Dessaux et al., 2002). En effet, les espaces poreux qu'occupent les racines peuvent être déformables sous la pression qu'elles exercent en y croissant (Callot et al., 1982 ; Calvet, 2003, Hinsinger et al., 2005). Les mouvements d'eau liés à l'absorption de l'eau par les racines modifient continuellement la structure du sol

(Bukman et al., 1990). Cela induit la diminution de la porosité de 20 à 24% dans le sol à proximité des racines (Gregory, 1996). De ce fait les argiles et sables fins qui entourent ces racines se tassent ; les argiles se compactent et deviennent plus denses (Read et Gregory, 1998). Watteau et al., (2006) mettent en évidence la contribution de l'humification racinaire dans l'évolution d'associations organo-minérales stables dans la rhizosphère de maïs d'un sol limoneux. L'importance de ces modifications dépend du type de racine, du taux de croissance racinaire, et de la nature physique du sol (Bonkowski et al., 2000).

4.4.3.Changement des propriétés chimiques

La rhizosphère est le siège d'interactions physico-chimiques entre racine, solution et constituants minéraux du sol (Figure 9) (Hinsinger, 2001). Le premier processus chimique qui a été décrit dans la rhizosphère est une conséquence directe de la principale fonction des plantes : l'absorption de l'eau et des nutriments par la racine, responsable de considérables changements dans la concentration des solutés (Hinsinger et al., 2006).

La rhizosphère et les processus qui s'y déroulent sont fortement influencés par les molécules et ions organiques ou inorganiques libérés par les racines. Ces molécules et ions peuvent directement mobiliser des éléments nutritifs, mais ils peuvent également modifier certaines conditions du milieu comme le pH qui est influencé par l'excrétion de substances racinaires (Alexis, 1988).

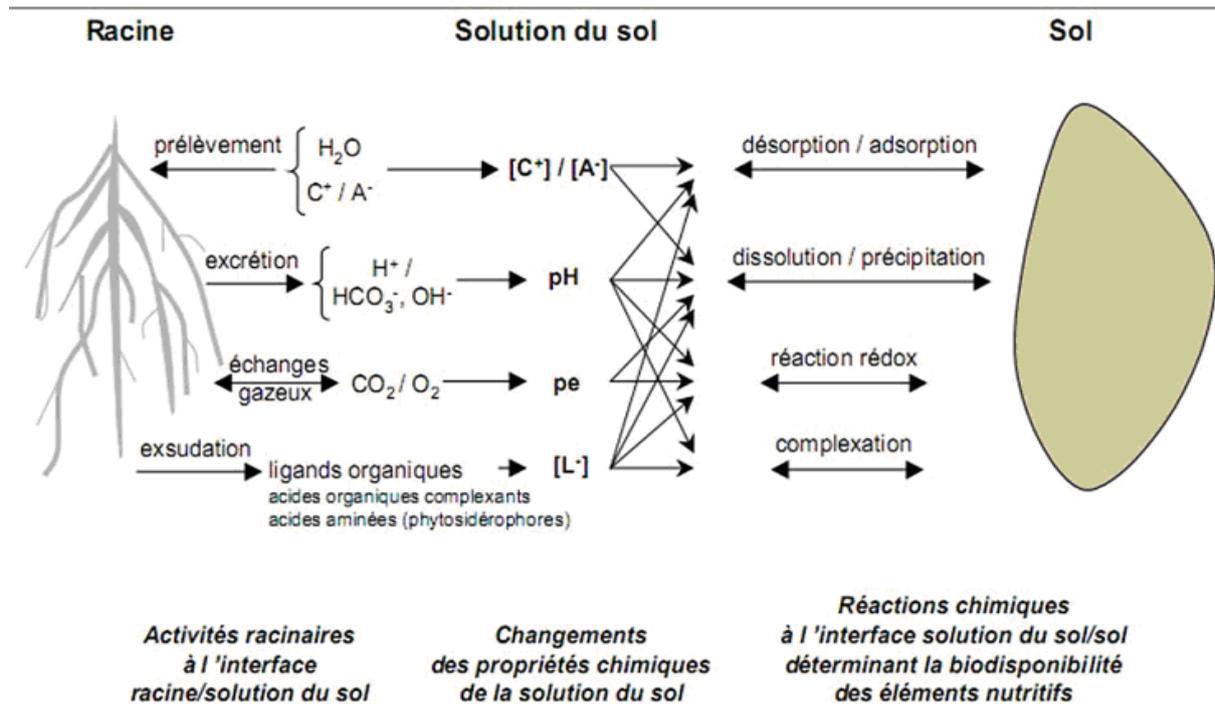


Figure 9 Représentation schématique des interactions physico-chimiques entre racine, solution et constituants minéraux du sol dont la rhizosphère est le siège (Hinsinger, 2001).

L'exsudation de composés organiques a beaucoup été étudiée en raison de son impact sur la microbiologie des sols (Jones et al., 2004). Certains exsudats et métabolites microbiens sont impliqués dans les processus biochimiques. Des enzymes telles que les phosphatases, les protéases, les sulfatases interviennent sur le cycle biogéochimique d'éléments tels que le phosphore, l'azote et le soufre (Hinsinger et al., 2006). Parmi les exsudats racinaires, les carboxylates comme le malate, le citrate et l'oxalate sont censés avoir l'effet le plus important en raison de leur implication dans la complexation de l'aluminium, du calcium, du fer et des éléments traces (Hinsinger, 2001). Les graminées secrètent des phyto-sidérophores (acides aminés) qui peuvent former des complexes plus stables que les carboxylates avec le fer, le zinc et le cuivre (Hinsinger, 1998; Chaignon et al., 2002). La respiration de la racine et des microbes dans la rhizosphère induit non seulement un accroissement de la pression de CO_2 mais aussi une diminution de la pression de O_2 bien que cela soit peu documenté dans la littérature (Hinsinger et al., 2006).

Le pH est un paramètre que les racines peuvent directement modifier (Hinsinger et al., 2009) à travers de multiples processus parmi lesquels, principalement, la respiration racinaire et la libération de H^+ ou OH^- pour compenser un excédant net de cations ou d'anions (Hinsinger et al., 2001). Ainsi, le pH de la rhizosphère peut différer de une à deux unités pH

de celui du sol ambiant (Hinsinger et al., 2005 ; Marschner et Römheld, 2006). Comme l'ont montré Hoffland et al., (1989), une même espèce cultivée, le colza, peut alcaliniser ou acidifier sa rhizosphère (Figure 10).

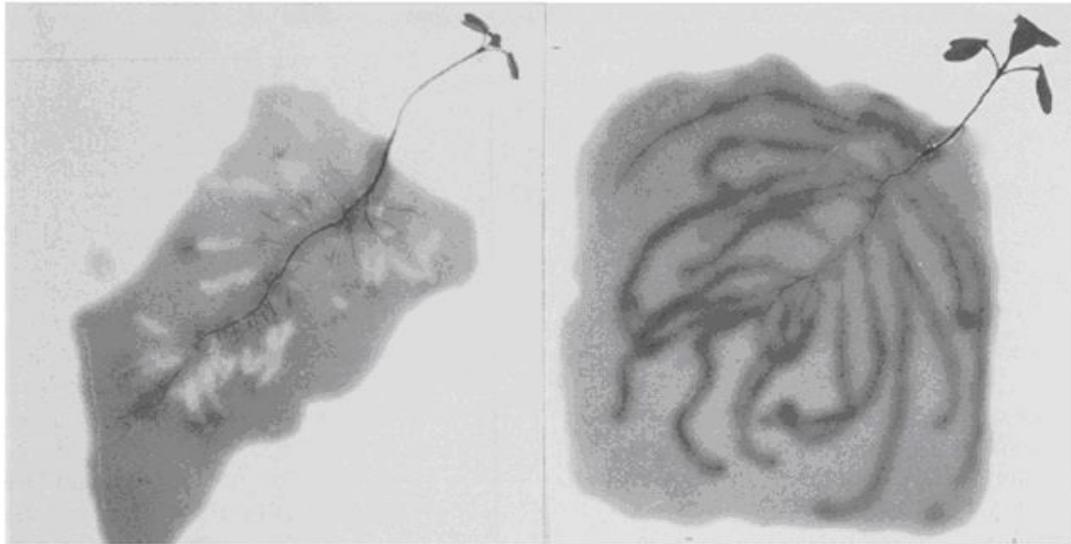


Figure 10 Acidification (en foncé) et/ou alcalinisation (en clair) d'une mince couche d'agar recouverte de racines d'une culture de colza de 7 jours avec une solution nutritive sans phosphore (à gauche) et avec phosphore (à droite). L'agar (pH= 5,8) contenait du rouge de bromocre sol (Hoffland et al., 1989).

Cette différence peut être due à plusieurs phénomènes tels que les prélèvements racinaires des cations K^+ et Ca^{2+} qui sont accompagnés d'excrétion d'acides (protons H^+ et acides organiques), contribuant ainsi à l'acidification du sol (Darrah et Jones, 1994) ou encore à une plus importante absorption de cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , NH_4^+) que d'anions (NO_3^- , PO_4^-) par les racines (Hinsinger, 1998), c'est le déséquilibre ionique (Grinsted et al., 1982). Dans les sols légèrement acides et pauvres en azote, les plantes acidifient leur rhizosphère par la libération de protons résultant d'un prélèvement moindre en anions qu'en cations, parce que l'azote est soit faiblement disponible, soit il est sous forme de NH_4^+ plutôt que sous la forme de NO_3^- (Turpault et al., 2003 ; Girard et al., 2005).

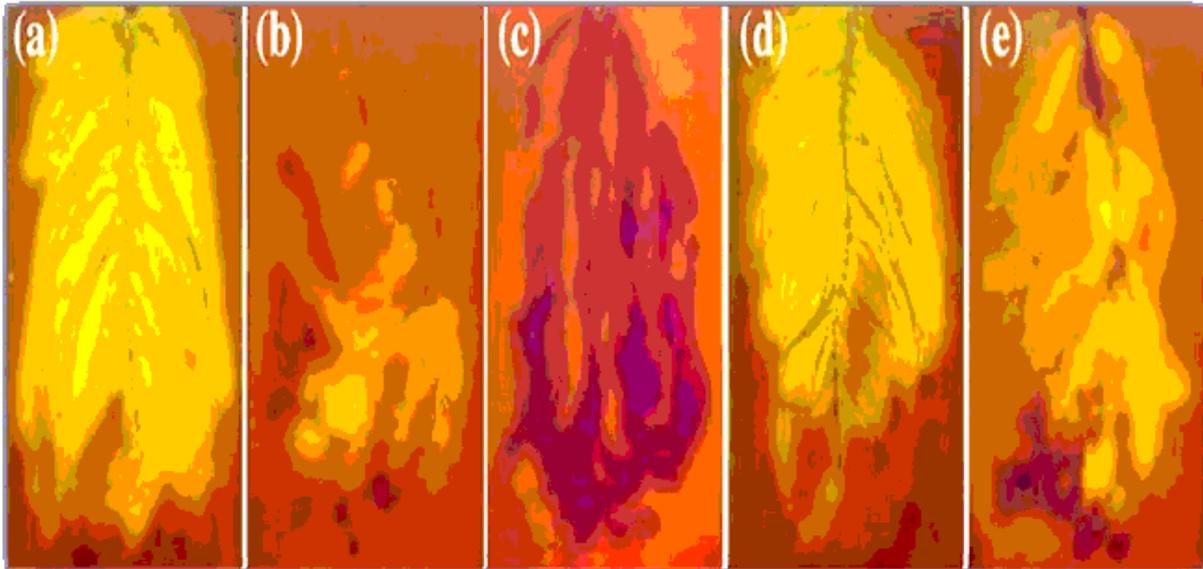


Figure 11 Visualisation de l'acidification de la rhizosphère de (a) féverole, (b) soja, (c) maïs, (d) féverole en association avec le maïs, (e) soja en association avec le maïs. Les racines sont imbibées d'un indicateur coloré de pH le bleu de bromocrésol (Zhou et al., 2009).

De nombreuses études menées au champ, dans diverses conditions de sol et de climat, pour différentes espèces forestières ou cultivées (Gobran et al., 1998 ; Chen et al., 2002 ; Chiu et al., 2002 ; Coline-Belgrand et al., 2003 et Dinesh 2010) ont révélé des changements de propriétés des sols autres que le pH. La teneur en carbone du sol, la capacité d'échange cationique, le taux de saturation en bases, en Ca^{2+} , en Mg^{2+} , en K^+ et en Na^+ , la teneur en azote total, en azote assimilable étaient différents de ceux du sol global. La rhizosphère est un lieu de transfert de l'eau et de solutés, selon les besoins des plantes et les conditions du milieu. La concentration des solutés peut varier d'une manière significative. Clegg et Gobran, (1997) ; Gobran et al., (1998) et Seguin et al., (2004) stipulent que les nutriments peuvent s'accumuler à proximité de la surface racinaire. La nature et l'intensité de changement des concentrations ioniques dépendent de la correspondance entre la demande des plantes et la fourniture du sol (Hinsinger, 1998). Gobran et Clegg (1996) ont proposé un modèle théorique de la biodisponibilité des nutriments dans un système sol minéral-rhizosphère (Figure 12), qui schématise les liens dynamiques entre les trois zones suivantes: sol global (bulk) rhizosphère (rhizo) et interface sol-racine (ISR).

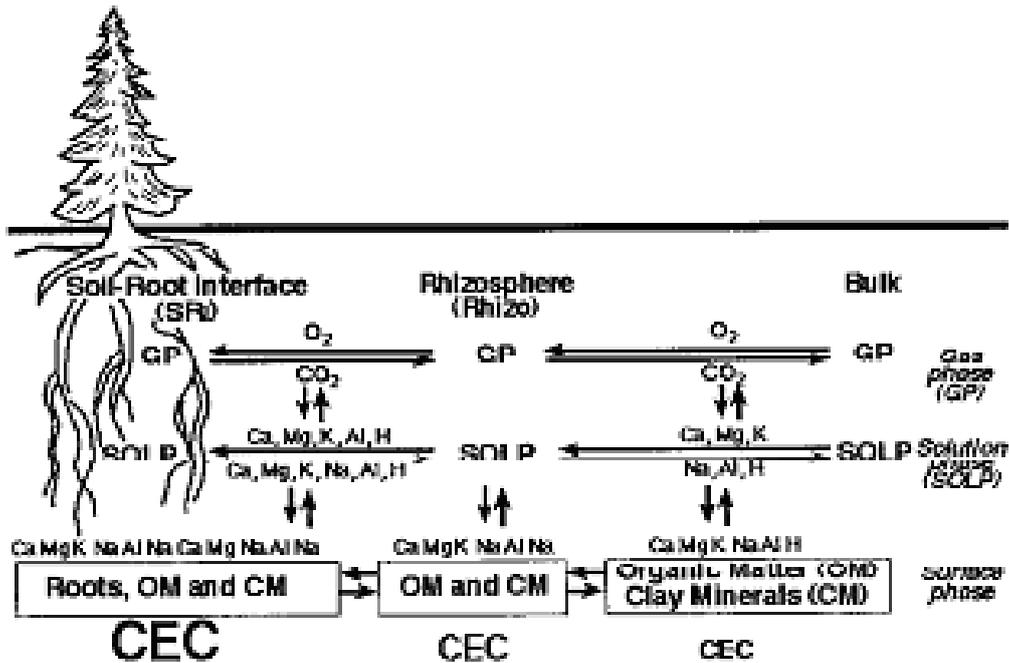


Figure 12 Représentation schématique du fonctionnement des racines induisant des modifications dans les propriétés physiques et chimiques de la rhizosphère (Gobran et Clegg, 1996).

4.4.4. Changement de la minéralogie

La vitesse d'altération de minéraux silicatés ferro-magnésiens augmente remarquablement sous l'action des racines de plantes cultivées (Duchaufour, 2001 ; Hinsinger et al., 2003). La racine est capable d'altérer les micas, par une libération des éléments échangeables de ces minéraux (K^+ et Mg^{2+}), correspondant à une ouverture des micas par échange ionique du potassium inter foliaire contre des cations hydratés avec vermiculisation des illites (Robert et Trocmé, 1979). Une gamme de processus peut-être impliquée comme l'exsorption de protons, d'anions organiques par les racines et l'épuisement des cations à des concentrations assez faibles pour déstabiliser la structure des cristaux comme lors de la vermiculisation de la phlogopite (Grégory, 2006). Une importante libération de potassium par altération de la phlogopite par la racine de ray gras (Figure 13) (Hinsinger et al., (1993) mais aussi de la biotite et de la phlogopite par celle de la luzerne (Norouzi et Khademi, 2010) dans la rhizosphère est attribuée par ces auteurs à l'importante acidification induite par la racine des plantes. Ainsi, les changements physico-chimiques du sol rhizosphérique induits par les racines et la microflore qui leur est associée influencent les processus d'altération et le prélèvement de nutriments par les plantes (Calvaruso et al., 2006).

Les micro-organismes plus nombreux dans la rhizosphère intensifient la décomposition de la matière organique et avec la diminution du pH augmentent l'altération des minéraux (Wang et Zabousky, 1998). Les racines des végétaux et les micro-organismes qui leur sont associés (mycorhizes) sont capables d'extraire des minéraux primaires un certain nombre d'éléments chimiques essentiels à leur croissance. Le rôle des mycorhizes durant la transformation du mica en vermiculite a été confirmé par Robert et Berthelin (1986).

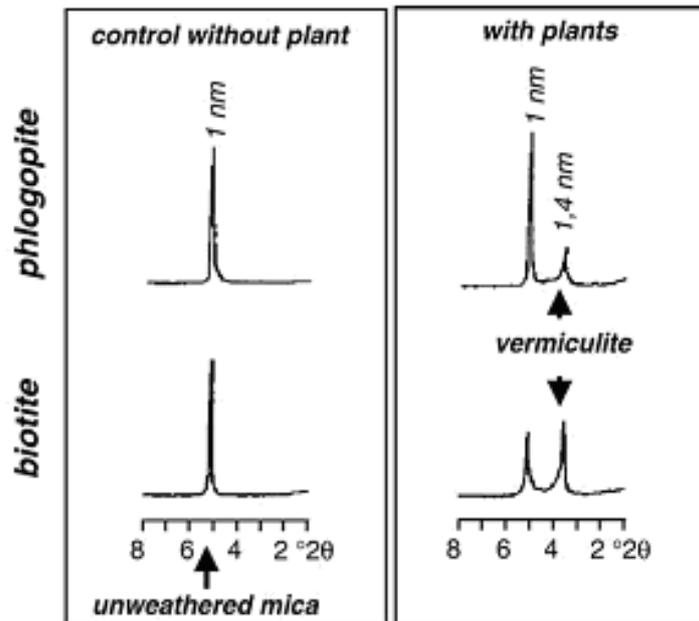


Figure 13 Altération révélée par la diffraction des Rayons X de biotite et de phlogopite soumis pendant 14 jours à une culture de ray gras alimentée par une solution nutritive sans potassium (Hinsinger et al. 1993).

Barré et al., (2007 b) qui ont cultivé du ray gras sur un substrat d'argiles (argiles des marais du Poitevin à prédominance d'argiles de type 2/1) montrent que l'activité de la racine de ray gras entraîne une diminution de l'aire relative du pic d'illite et un déplacement du pic de la smectite vers le domaine des petits angles (Figure 14).

Le statut nutritionnel de la plante peut influencer sur l'altération de minéraux dans la rhizosphère. Wang et al., (2000) ont montré qu'une carence en phosphore entraînait une mobilisation significativement plus accrue du potassium à partir de gneiss et de feldspath par les racines de maïs et de ray grass en raison d'une exsudation d'acides organiques plus

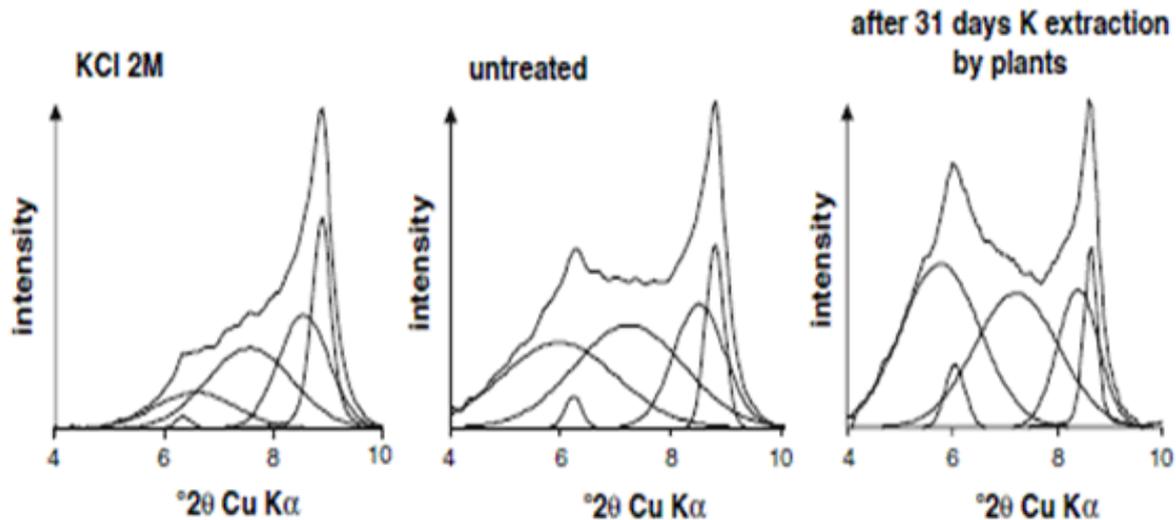


Figure 14 Diffractogrammes décomposés de la fraction argileuse saturée au potassium, sans traitement et après 31 jours de culture de Ray Grass (Barré et al. 2007 b).

importante par les plantes. Turpault et al., (2009), ont démontré que pour un écosystème forestier tempéré, l'altération de minéraux comme l'apatite et la labradorite ne se produisait qu'en condition de déficience en calcium des sols. Paris et al., (1996) ont montré qu'en conditions de déficience en K^+ et Mg^{2+} des ectomycorhizes pouvaient extraire du potassium non échangeable de la phlogopite et ceci par excrétion de H^+ et d'acide oxalique.

De façon générale les études menées sur la rhizosphère en conditions contrôlées concluent à une altération de minéraux comme la biotite et la phlogopite révélée par l'apparition d'un pic de vermiculite (Hinsinger et al., 1993), de la palygorskyte en kaolinite (Khademi et Arocena, 2008).

Bakker et al., (2004) ; Augusto et al., (2000 ; 2001) ont démontré le rôle des essences forestières en conditions naturelles sur l'altération des plagioclases, des feldspaths et de la vermiculite dans des conditions acides. Une synthèse de résultats d'études menées en conditions naturelles principalement sur la rhizosphère d'arbres forestiers (April and Keller, 1990; Courchesne et Goran, 1997 ; Gobran et al., 1998 ; Hurault et al., 2008, Calvaruso et al., 2009). Ces auteurs ont montré une évolution des argiles dans la rhizosphère in situ à l'aide de la diffraction des Rayons X. April et Keller (1990) détectent une diminution de l'intensité du pic de la vermiculite avec une augmentation concomitante de celle de l'illite dans le rhizoplan (Figures 15 et 16). Pour ce qui est des cultures au champ, Vincenzo et al., (2003), mesurent un déplacement du pic de 1,6 nm dans le sol global vers les grands angles

dans la rhizosphère (1,5 nm) qu'ils attribuent à une fixation plus intense du potassium par les argiles rhizosphériques d'une culture de maïs.

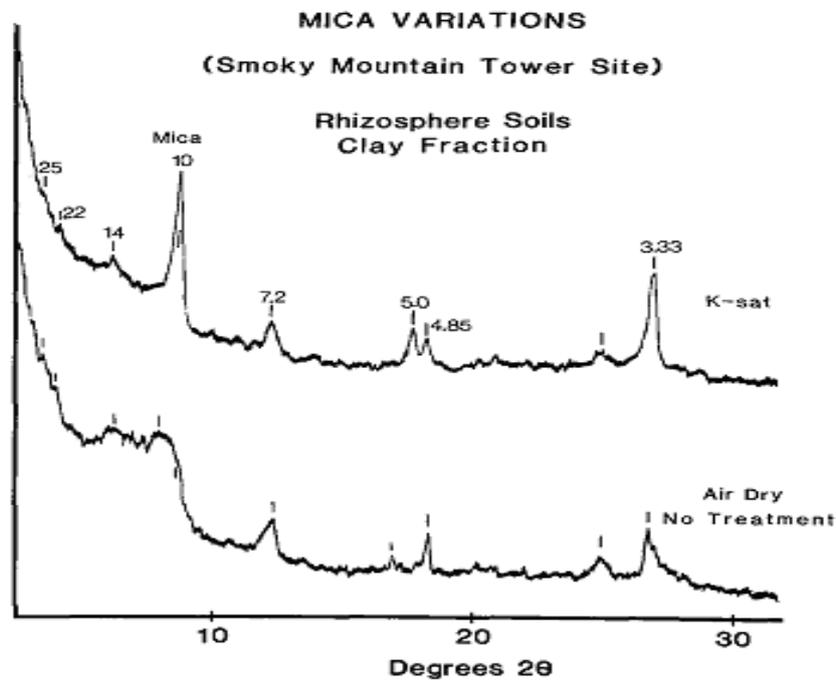


Figure 15 Diffractogrammes de la fraction $< 2\mu\text{m}$ du sol rhizosphérique d'arbres forestiers (April et Keller, 1990).

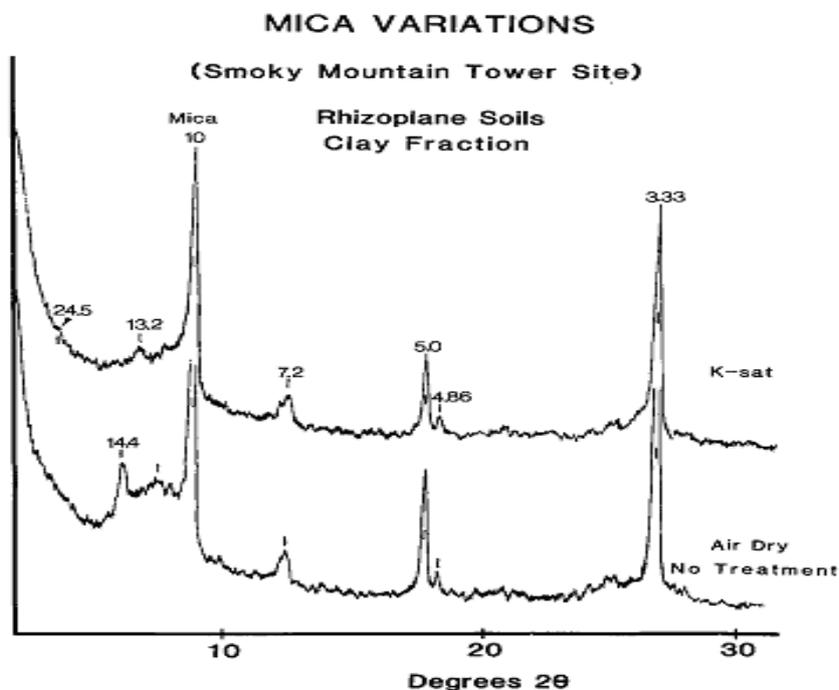


Figure 16 Diffractogrammes de la fraction $< 2\mu\text{m}$ du rhizoplan d'arbres forestiers (April et Keller, 1990).

Plus récemment, Turpault et al., (2008), grâce à l'utilisation du programme Decomp de décomposition de diffractogrammes d'argiles (Reynold, 1997), déterminent une diminution de l'aire relative de la vermiculite et un accroissement de celle de l'illite dans le sol rhizosphérique comparativement au sol global (Figure 17). De plus, les diffractogrammes des argiles de la rhizosphère saturées au calcium et au potassium sont très proches, ce qui indique bien que la formation de feuillets d'illite par fixation du potassium est plus faible dans le sol rhizosphérique comparativement au sol global.

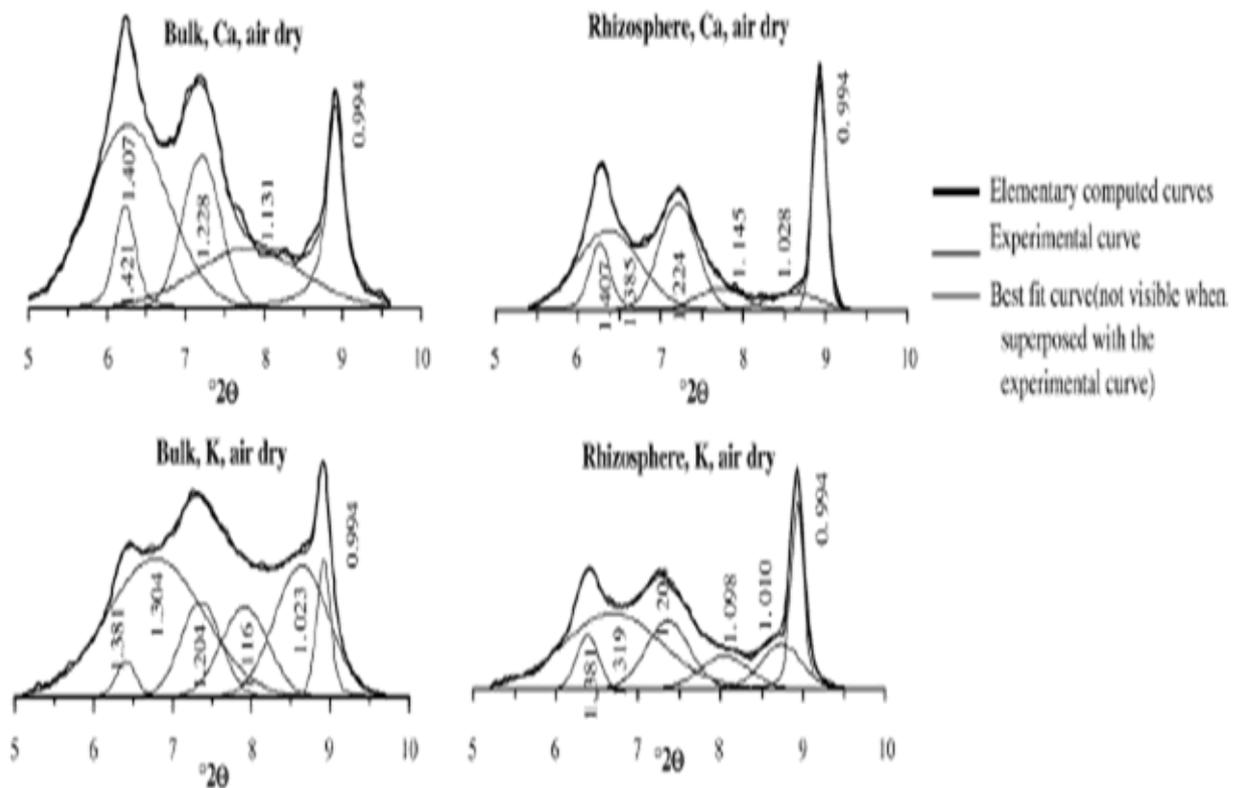


Figure 17 Diffractogrammes décomposés de la fraction $< 2\mu\text{m}$ du sol rhizosphérique d'arbres forestiers (Turpault et al., 2008).

La coexistence de plusieurs minéraux dans la rhizosphère d'espèces au champ dont certains sont altérés alors que d'autres comme l'illite ou la vermiculite fixent le potassium (libéré par altération), expliquerait la différence avec les études menées en conditions contrôlées dans lesquelles, souvent, uniquement une altération des minéraux est constatée. En effet, dans ce type d'études, souvent le substrat est constitué d'un seul minéral (biotite, phlogopite, chlorite, palygorskyte), les produits de l'altération qui ne peuvent pas précipiter comme le potassium sont récupérés dans les eaux de drainage (Arocena et Glowa, 2000). Ce qui n'est pas le cas en conditions naturelles, la coexistence de différents minéraux les uns fixant le potassium (illite, vermiculite), les autres le libérant (biotite, phlogopite) explique

l'intensification du pic de l'illite (fixation d'une partie du potassium libéré par altération et qui ne serait plus perdu dans les lexiviats) qui est observée à proximité de la racine comparativement au sol global.

5. Biodisponibilité des nutriments et fonctionnement de la rhizosphère

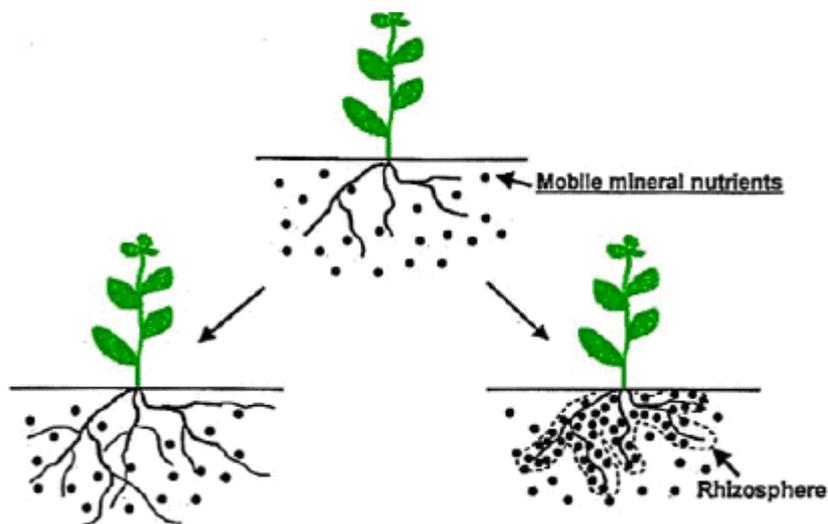
La faible teneur en éléments nutritifs des sols, leur mobilité réduite, leur forte rétention par la phase solide du sol déterminant ainsi leur solubilité limitée expliquent la biodisponibilité réduite des nutriments dans les sols. Par conséquent, la nutrition minérale des plantes résulte, pour une large part du fonctionnement de leur rhizosphère (Jaillard al., 2000). De plus, la distribution spatiale de ces éléments dans les sols est très hétérogène, l'accessibilité aux nutriments devient alors cruciale (Hinsinger et al., 2009).

Les plantes ont développé toute une gamme de stratégies (Figure 18) pour accéder aux nutriments (Marschner, 1995). Rengel et Marschner (2005) expliquent que ces stratégies sont basées sur des mécanismes liés à la plante, la plupart des plantes peuvent modifier leur système racinaire (prolifération des racines et du chevelu racinaire, infection mycorhizienne), mais aussi à travers l'exsudation racinaire. Par exemple, les plantes qui se développent dans des sols déficients en phosphore allouent une proportion importante des photos assimilats au développement racinaire et tentent de produire des racines de diamètre très fin pour augmenter la surface d'absorption des éléments nutritifs (Rengel et Marschner 2005).

Les plantes présentent de grandes différences dans leur capacité à mobiliser et à utiliser les nutriments à travers les processus de la rhizosphère, comme l'exsudation racinaire et l'activité microbienne (Zang et al., 2010). Le système racinaire des plantes peut en effet excréter dans le sol des molécules organiques diverses ; acides organique, enzymes et chélateurs tels que les phytosidérophores en quantité assez importante pour mobiliser certains ions nutritifs. Ainsi, la rhizodéposition peut jouer un rôle important pour la nutrition minérale des végétaux, en participant à la mobilisation de micronutriments tels que le fer, le zinc, le cuivre et de nutriments majeurs tels que le phosphore (Hinsinger et al., 2009). Les phosphates insolubles sont mobilisés par la sécrétion de composés organiques, acidifiants pour le phosphate de calcium (acide citrique, lupin), complexant pour les phosphates lié aux oxydes de fer et aluminium (Hinsinger, 1998).

La biodisponibilité des éléments dans la rhizosphère est contrôlée par l'effet conjugué des propriétés du sol, des caractéristiques des plantes et des interactions entre les racines des plantes et les micro organismes (Jones et al., 2004 ; Rengel et Marschner, 2005) . Les micro organismes de la rhizosphère décomposent les exsudats racinaires, les résidus des racines et indirectement modifie le développement des plantes et la composition des communautés végétales en influençant la quantité d'éléments biodisponibles (Zhang et al., 2005).

Nutrient acquisition and rhizosphere functioning



Enhanced spatial availability

stimulation of root growth
 elongation and proliferation on root hairs
 enhanced formation of fine roots
 enhanced mycorrhizal colonization

Enhanced chemical availability

Modification in: pH
 redox potential
 microbial activity
 Release of: chelators
 enzymes

Figure 18 Acquisition des éléments nutritifs et fonctionnement de la rhizosphère (Wenzel et Fitz 2005).

Concernant le potassium, Römheld et Kirkby (2010) soulignent que l'acquisition du potassium du sol par les plantes dépend de nombreux facteurs physiques et chimiques du sol qui vont dans une large mesure déterminer le développement et la distribution spatiale des racines dans les sols et leur aptitude à prélever les nutriments. La déficience en bore du sol, la toxicité par l'aluminium dans les sols acides, la compaction, la salinité, la dessiccation des sols inhibent le développement du système racinaire et par conséquent réduisent l'acquisition du potassium du sol par les plantes en raison de leur influence sur la biodisponibilité spatiale du potassium (Römheld et Neumann 2006).

En absence d'apport de potassium, Van Hees et al. (2006) ont montré que des plants de conifères mycorhizés ont mobilisé des quantités appréciables de potassium, ce qui s'est reflété sur la teneur en potassium foliaire et le réapprovisionnement du pool échangeable de potassium des sols.

6.Potassium dans la rhizosphère

6.1.Formes bio disponibles du potassium dans la rhizosphère

Le tableau 1 synthétise les résultats de 24 publications portant sur la comparaison de la biodisponibilité du potassium entre le sol global et la rhizosphère d'espèces annuelles, pérennes, en conditions contrôlées ou au champ, cultivées sur différents sols et dans différentes zones climatiques.

Contrairement à ce qui est généralement admis, soit une diminution du potassium à proximité de la racine, ce qui reste toutefois valable pour des cultures conduites en pots et en conditions contrôlées (Niebes et al., 1993 ; Hylander et al., 1999 ; Moritsuka et al., 2004 ; Wang et al., 2004 ; Barré et al., 2007 b ; Li et al., 2009), des études portant sur la rhizosphère d'arbres forestiers ou de plantes cultivées au champ dans diverses conditions éco pédologiques ont montré une plus forte concentration du potassium dans le sol rhizosphérique comparativement au sol global (Majdi et Bergholm 1995 ; Violante et al., 1996 ; Vincenzo et al., 2003) Wang et Zabousky 1998 ; Bagayoko et al., 2000 ; Chiu et al., 2002 ; Yanai et al., 2003 ; Turpault et al., 2005 ; Chen et al., 2006 ; Zhu et al., 2006 ; Turpault et al., 2007 ; Dinesh et al., 2010 ; Calvaruso et al., 2011).

La concentration du potassium dans la rhizosphère trouve son explication dans divers processus souvent identifiés lors de l'étude de la rhizosphère en conditions contrôlées. On peut citer l'importante libération de potassium par altération de la phlogopite par la racine de colza (Hinsinger et al., 1993) mais aussi de la biotite et de la phlogopite par celle de la luzerne (Norouzi et Khademi, 2010) dans la rhizosphère. Cette libération de potassium est attribuée par ces auteurs à l'importante acidification induite par la racine des plantes.

Le mass flow et l'exsudation de composés organiques élèvent la concentration des éléments nutritifs dans la rhizosphère, comme le potassium. Les exsudats racinaires font augmenter la concentration en K dans la solution du sol de 3 à 6 μM , leur variation étant liée au type de sol et à l'espèce végétale (Claassen et Trehan, 1998).

Tableau 1 : tableau synthétique de la comparaison de la concentration en potassium du sol global et de la rhizosphère en conditions contrôlées et au champ

Profil	Formes de K	Culture	Espèces	Sol	Fertilisation	Geographie	Références
N	Ks,Ka,Kne	Pots, rhizotron	<i>Zea mays L., P. deltoides,P. abies,Rape, rice, rassaica</i>		F et NF		Niebes et al. (1993) ; Zhang et George (2009) ; Wang et al. (2005) Li et al. (2009))
N et I	Ks,Ka,Kne	Pots,	Brassica	Paddy soil	F		Hylander et al. (1999) ; Shi et al. (2004)
N	Ks,Ka,Kne	Pots,	Brassica	Ultisol	F		
				Andosol	F		
N	Ka,Kne	Rhizobox,	<i>Zea mays L.</i>	fluvisol	F		Moritsuka et al.(2004)
				Biotite	F		
N	K total	Pots	<i>Lolium multiflorum L</i>	Clays	F		Barré et al. (2007b)
				Typic	F	Beaujolais	Turpault et al. (2005,2007), Calvaruso et al. (2011)
I	Ks,Ka	Forest	<i>Pseudotsuga menziesii L.</i>	dystrochrept	F	Mountains	
				Typic	F et NF	Washington	Wang et Zabowsky (1998)
I, NE	Ks	Forest	<i>Pseudotsuga menziesii L.</i>	haplorthods			
				Podzol,	F et NF	Sweden	Majdi et Bergholm(1995) ; Yanai et al. (2003)
I	Ks,Ka,	Forest	<i>P. abies, P.sylvestris</i>	sandy,clayey soil,	F et NF	Sweden	
I	Ka	Forest	<i>Tsuga et yushania</i>	Lithic	NF	Taiwan	Chiu et al. (2002)
I	Ka	Field	Cereales et legumes	Dystrudepts Acid sandy soil	F	SudanoSahelian West Africa	Bagayoko et al.(2000)
I	Ks,Ka,Kn	Field	<i>Zea mays L</i>	Vertic Xerofluent	F et NF	Italy	Violante et al.(1998) ; Vincenzo et al.,(2003)
I	Ks,Ka,Kne	Field	<i>Camellia Alianthus triphysa</i>	Ultisol,brown Red soil	NF	Taiwan,China	Chen et al.(2006) ; Zhu et al.(2006)
I	Ka	Field	<i>ErythrinaGaruga pinata</i>	Instic haplohumult		India	Dinesh et al.(2010)
I	Ks, Ka	Forest	<i>Picea abies L.</i>	Haplic	F et NF	Sweden	Clegg et Gobran (1997)
I	Ka	Forest	<i>Populus tremuloides L.</i>	podzol		Canada	Seguin et al. (2004)
N	Ks	Pots	Herbs		NF	Sweden	Schottelndreier et Falkengren-Grerup (1999)
I	Ks	Field	Herbs	Luvisolic soil	NF	Sweden	

I: profil inversé, accumulation de K dans la rhizosphère

N : profil normal diminution de K dans la rhizosphère

SE : sans d'effet

Ks, Ka, Kne : potassium soluble, potassium assimilable, potassium extractible aux acides forts dilués.

F et SF: avec et sans fertilisation.

Les racines et les microorganismes qui leur sont associés comme les bactéries et les ectomycorhyses produisent divers composés comme les protons, acides organiques et acides organiques complexant (Grayston et al., 1996 ; Jones 1998 ; Wang et Zabousky 1998 ; Ström et al., 2002 ; Marschner et Timonen 2006 ; Jones et al., 2009) qui sont d'importants facteurs de l'altération des minéraux et de la biodisponibilité des éléments nutritifs (Harley et Gilkes 2000, Bakker et al., 2004 ; Rosenstock, 2009 ; Turpault et al., 2009). Les mycorhizes pourraient transporter et accumuler le potassium dans la rhizosphère, aussi bien que libérer des enzymes pour intensifier la minéralisation (Finley 1992, 1995, Arocena et Glowa, 2000). Ainsi, l'altération biologique joue un rôle prépondérant dans la nutrition des plantes, en particulier dans les écosystèmes forestiers qui sont des écosystèmes à faible intrants, très sensibles aux carences nutritives et à l'acidification (Frey-Klett et al., 1999).

L'ensemble de ces processus conduisent à un enrichissement de la rhizosphère en éléments nutritifs. Ces processus sont aussi bien identifiés en conditions contrôlées qu'en conditions au champ. On pourrait donc s'interroger sur les deux tendances opposées qui se dégagent du tableau 1. La concentration du potassium dans la rhizosphère est la résultante de deux composantes : une accumulation de potassium dans la rhizosphère et à l'opposé un appauvrissement de celle-ci par le prélèvement racinaire. En conditions contrôlées, les études sont conduites en conditions optimales (apport de solution nutritive, température optimale, irrigation...) qui conduisent la plante à effectuer un prélèvement maximal des éléments nutritifs y compris le potassium absent de la solution nutritive. La demande de la plante en potassium se révèle alors supérieure à celle que peut fournir le sol à proximité de la racine. La conséquence en est un appauvrissement relatif en potassium de la rhizosphère comparativement au sol global.

Dans les conditions au champ, en plus des processus rhizosphériques entraînant une mobilisation plus importante du potassium, Vetterlein et Reinhold (2004) expliquent que la diminution de la quantité d'eau à proximité des racines favorise l'accumulation du potassium dans la rhizosphère. En effet, Doussan et al., (2006) ont mis en évidence un front d'extraction d'eau causé par la transpiration du lupin autour du système racinaire qui apparaît au bout de quelques heures. L'augmentation de la concentration en potassium dans la solution du sol rhizosphérique a pour conséquence que le potassium est immédiatement adsorbé par les sites planaires (augmentation du KNH_4^+) mais aussi fixé par les sites de serrages (augmentation du

potassium non échangeable). Violante et al., (1998) ; Vincenzo et al., (2003) précisent que ces processus sont d'autant plus importants que le taux d'argiles augmente au voisinage de la racine.

L'examen du tableau 1 montre un enrichissement ou accumulation du potassium dans la rhizosphère d'espèces cultivées au champ. Il semblerait que la prédominance de la libération du potassium dans la rhizosphère sur le prélèvement racinaire du potassium explique l'accumulation du potassium dans la rhizosphère concluent Wang et Zabowsky, (1998), Yanai et al., (2000), Turpault et al., (2005) dans leurs études sur l'effet de la racine de *Pseudotsuga menziesii* L. et *Picea abies* L. et Zhu et al., (2006) dans son étude sur l'effet de la racine de thé.

Les travaux de Schotteindreier et Falkengren-Grerup (1999) sont intéressants dans le sens où ils comparent la rhizosphère de mêmes espèces de graminées cultivées en conditions contrôlées et au champ. Ils aboutissent à la même conclusion soit un appauvrissement de la rhizosphère en potassium lorsque les graminées sont cultivées en conditions contrôlées et un enrichissement en potassium de la rhizosphère lorsque les graminées sont cultivées au champ.

Un autre processus bien connu chez les graminées, l'exsudation de potassium par ces dernières en fin de cycle (Volanté et al., 1998, Vincenzo et al., 2003) expliquent dans une certaine mesure l'enrichissement de la rhizosphère en potassium. Smith (1976) qui a analysé les exsudats racinaires de trois espèces forestières échantillonnées en conditions naturelles a montré que les trois espèces d'arbres avaient libéré des cations suivant l'ordre décroissant Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , NH_4^+ et Mg^{2+} , le K^+ et le Ca^{2+} étant libérés dans des quantités plus importantes que NH_4^+ et Mg^{2+} (Tableau 2). Les quantités de potassium restituées variaient de 0,94 à 4kg/ha/an.

Le calcium et le magnésium tendent à s'accumuler et même à précipiter à proximité de la racine en raison de leur concentration élevée dans les sols, supérieure au besoin des plantes (Tableau 2) (Clegg et Gobran, 1997 ; Hinsinger, 1998). Schotteindreier et Falkengren-Grerup (1999), montrent en plus d'une accumulation de calcium, de magnésium et de potassium celle aussi du phosphore. Mais par contre pour les formes bio disponibles de l'azote, ces auteurs mesurent plutôt une diminution des nitrates à proximité immédiate de la racine

d'herbacées (Tableau 3). Toujours selon ces auteurs, la concentration de l'ammonium dans la rhizosphère comparativement au sol global dépend de l'espèce d'herbacées considérée.

Tableau 2 : exsudation d'ions par des racines d'espèce forestière ($\mu\text{g}/\text{mg}$ de racines sèches durant 14 jours) d'une forêt du New Hampshire (Smith, 1976)

Exudats racinaires ion	Espèce		
	<i>Betula alleghaniensis</i> L.	<i>Frangus grandifolia</i> L.	<i>Acer saccharum</i> L.
Cations			
Na ⁺	55,58±6,62*	18,52±1,93	17,43±2,79
K ⁺	12,80±1,33	4,23±0,49	5,09±0,84
Ca ⁺⁺	4,81±0,47	2,00±0,22	3,15±0,36
NH ₄ ⁺	1,59±0,12	0,53±0,08	0,59±0,07
Mg ⁺⁺	0,25±0,04	0,07±0,01	0,36±0,09
Anions			
SO ₄ ⁻	11,19±0,82	2,43±0,14	2,90±0,27
CL ⁻	5,10±0,96	0,24±0,03	0,43±0,06
PO ₄ ⁻⁻⁻	1,61±0,10	0,23±0,03	0,28±0,07
NO ₃ ⁻	0,12±0,02	0,06±0,01	0,05±0,01
Total ions	93,05	28,31	30,28

Le statut nutritionnel du végétal pourrait aussi intervenir. En effet Wang et al., (2000) ont montré qu'une déficience en phosphore entraînait une mobilisation significativement plus accrue du potassium à partir de gneiss et de feldspath par les racines de maïs et de ray grass en raison d'une exsudation d'acides organiques par les plantes.

Dans les sols agricoles et forestiers les ressources des sols sont inégalement réparties dans l'espace (Robinson 1996 ; Eissenstat et Volder, 2005 ; Ma et al., 2007). Robinson (1996) mesure dans une steppe dominée par *Artemisia tridentata* une forte variabilité spatiale pour le phosphore avec des zones enrichies (environ 31mg. Kg⁻¹de phosphore) et des zones appauvries (environ 20mg. Kg⁻¹de phosphore) en forte association avec d'autres variables du sol comme la matière organique, le potassium, la nitrification et la minéralisation. Toujours selon ces auteurs, les composés azotés (NH₄⁺, NO₃⁻) varieraient quant à eux entre 386% et 116% respectivement. Cette hétérogénéité serait d'autant plus forte que les sols sont peu remaniés. Lorsque l'on sait que les quantités de potassium mesurées dans les racines et les feuilles sont de l'ordre du millier de mg. Kg⁻¹ alors que les taux de potassium du sol sont de l'ordre de la dizaine de mg. Kg⁻¹, on comprend aisément que le potassium d'une rhizosphère

se développant dans des zones enrichies en litière racinaire et foliaire puisse présenter des différences importantes avec celui du sol indemne de toute activité racinaire. Pour Clegg et Goran (1997) ; Schottelndreier et Falkengren-Grerup (1999), l'aptitude des plantes (*Picea abies* L et graminées) à explorer des zones enrichies du sol expliqueraient une grande partie des différences entre le sol global et le sol rhizosphérique. Ainsi, la prolifération préférentielle des racines dans des zones enrichies en éléments nutritifs (Robinson, 1994 ; Hodge, 2004) doit être prise en compte lorsque, en particulier pour les écosystèmes pauvres en éléments nutritifs, la rhizosphère s'enrichit comparativement au sol indemne d'activité racinaire.

En terme de coûts, l'exsudation de carbone 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 accentuer la prolifération racinaire dans les zones enrichies et ainsi maximiser le prélèvement des nutriments (Eissenstat et Volder, 2005). Hinsinger et al., (2005) signalent qu'il est difficile de distinguer l'effet du à l'activité de la racine de celui du à l'hétérogénéité du sol, en particulier dans les sols peu remaniés.

Tableau 3 : changement de la concentration en nutriments (μM) échantillonnées in situ dans la rhizosphère de 5 espèces herbacées.

Espèces	Ca	Mg	K	NH ₄	NO ₃	H ₂ PO ₄
<i>Deschampsia flexuosa</i>	53*	42*	73*	-15*	-32*	7*
<i>Lamium galeobdolon</i>	145*	80*	124*	31*	-2*	24*
<i>Mercurialis perennis</i>	43*	9*	-13*	-11*	-52*	7*
<i>Millium effusum</i>	105*	60*	22*	1*	-67*	12*
<i>Poa memorialis</i>	92*	32*	24*	-4*	-84*	7*

*: différence significative à $p < 0,05$. Les valeurs positives indiquent une augmentation de la concentration (Hinsinger et al., 2009).

6.2. Fixation du potassium dans la rhizosphère

La fixation du potassium par la fraction argileuse du sol rhizosphérique a déjà été observée pour des sols forestiers (épinette rouge et bouleau jaune) dans les Smoky Mountains (USA) par April et Keller (1990) et pour le douglas par Turpault et al., (2008) dans les montagnes du Beaujolais (France). Pour April et Keller (1990), cette fixation du potassium par les argiles se traduisait par une intensification du pic de l'illite dans la rhizosphère. Pour

les sols cultivés (maïs), Violante et al., (1998), Vincenzo et al., (2003) expliquent cette fixation du potassium plus élevée dans la rhizosphère, par une plus forte sélectivité de cette dernière vis-à-vis du potassium comparativement au sol global.

Zeng et Brown (2000) qui ont soumis une culture de maïs sur un sol limoneux à une série de 4 cycles humectation-dessiccation ont montré que la rhizosphère avait fixé plus de potassium que le sol global sous l'effet de l'alternance humectation-dessiccation comparativement à celle de la culture dont le sol avait été maintenu à humidité constante. Ce sont les sites en position interfoliaire des argiles qui présentent la plus forte sélectivité vis-à-vis du potassium (Goulding, 1983). Des sols soumis à une dessiccation ou bien à un nombre répété de cycles humectation-dessiccation vont fixer du potassium (Quemener, 1986 ; Goulding, 1987 ; Sahu et Gupta, 1987). Durant la libération-fixation par exemple ou lors de l'alternance humectation-dessiccation, les particules d'argiles peuvent se réaligner, se rapprocher (Andréoli, 1989), les cavités ditrigonales de deux feuillets successifs se trouveraient face à face emprisonnant le potassium et créant une structure semblable à celle des micas (Gaultier et Mamy, 1979). La dessiccation, l'alternance humectation-dessiccation utilisées au laboratoire reproduisent assez bien les conditions naturelles auxquelles sont soumis les sols (Mamy et Gaultier, 1974). Le sol global et le sol rhizosphérique seraient aussi soumis à ce type de contraintes. Néanmoins, il se pourrait que les sols rhizosphériques soient soumis à une dessiccation et à une fréquence de cycle humectation-dessiccation plus importantes. Whalley et al., (2005), Doussan et al., 2006) observèrent une dessiccation progressive du sol à proximité de la racine assez rapide (de l'ordre de l'heure) comparativement au sol global, qui s'intensifiait avec la transpiration de la plante au cours de la journée. A l'opposé, cet assèchement du sol diminue lorsque la transpiration cesse au cours de la nuit (Hinsinger et al., 2009). Selon cet auteur, un transfert d'eau a été observé à partir de la racine vers le sol, au cours de la nuit, de l'ordre de 14 à 30% de l'évapotranspiration journalière et ceci pour une trentaine d'espèces de plantes différentes. Cette alternance de dessiccation de la rhizosphère dans la journée et sa réhumidification la nuit fait que cette zone de sol serait soumise à une fréquence de cycle humectation dessiccation plus intense que le sol indemne d'activité racinaire. Par conséquent, une fixation plus accrue du potassium en position inter foliaire des argiles révélée par des teneurs en potassium non échangeable et un nombre feuillets d'illite plus élevés à proximité de la racine est observée.

7. Influence des espèces sur la rhizosphère

L'importance des modifications dans la rhizosphère dépend non seulement des facteurs édaphiques et climatiques mais aussi de l'activité des racines et des microorganismes qui lui sont associés lesquels apparaissent comme reliés à l'espèce d'arbre, à son génotype et à la fertilité des sols (Chen et al., 2006). Augusto et al., (2002) ; Chiu et al., (2002); Chen et al., (2006); Calvaruso et al (2011) ; Dinesh et al., (2010) ont démontré que les racines des différentes espèces d'arbres variaient dans leur influence sur les propriétés des sols et des communautés biologiques créant ainsi un environnement de sol distinct à l'interface sol-racine. Par exemple, Chen et al., (2002) mesurèrent une diminution des formes du phosphore biodisponible associée à une augmentation de la biomasse microbienne plus importante dans la rhizosphère de *Pinus radiata* comparativement à celle du ray grass. Marschner et al., (2007) montrèrent l'existence de communautés microbiennes différentes dans la rhizosphère de trois génotypes de Brassica, qui pourraient intervenir dans la capacité des plantes à maintenir une haute biodisponibilité en phosphore.

Des différences significatives entre le carbone du sol, la CEC, le potassium assimilable, l'azote total du sol, sont déterminées dans la rhizosphère de trois génotypes de thé par Chen et al., (2006). Cet impact différent des espèces d'arbres sur les propriétés des sols a été attribué par divers auteurs pour des espèces forestières de climat tempéré (Gobran et Clegg 1996 ; Gobran et al., 1998 ; Wang et Zabowsky 1998 ; Turpault et al., 2007 ; Calvaruso et al., 2011), pour des espèces tropicales (Chiu et al., 2002 ; Dinesh et al., 2010 ; Chen et al., 2006) à la qualité de la litière, des exsudats racinaires et du prélèvement des nutriments. Puisque les apports de matière organique dans les sols proviennent principalement des plantes via la rhizodéposition et la décomposition de la litière racinaire et des feuilles (Ayres et al., 2009), on peut penser que différentes espèces d'arbres auront un impact différent sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols à proximité de leurs racines. En effet, Grayston et al., (1996), précisent que la quantité et la qualité des rhizodépôts sont sous le contrôle génétique des plantes.

Smith (1976) montrent une importante variation dans la composition des exsudats minéraux libérés par des arbres en fonction de l'espèce (Tableau.2). L'examen de ce tableau montre qu'excepté le Na^+ c'est le K^+ qui est libéré en plus forte quantité.

8. Concept de gestion de la rhizosphère

La gestion de la rhizosphère dans l'objectif d'un développement durable du système plante-sol pourrait être l'une des approches pour optimiser l'utilisation efficace des ressources du sol dans différents systèmes de cultures.

Le concept de gestion de la rhizosphère consisterait en une manipulation des processus biologiques, chimiques et physiques à l'interface sol-racine. En effet, l'effet rhizosphérique favorise la croissance et la qualité végétale. Les micro-organismes rendent disponibles dans la solution du sol des éléments tels que le fer, le calcium, le potassium et le phosphore initialement présents sous forme minérale et organique stable et complexe, forme inaccessible pour la plante.

Ce concept engloberait des actions sur le système racinaire, l'amélioration de la biodisponibilité des nutriments par la manipulation de l'exsudation racinaire, l'utilisation de mycorhizes et autres micro organismes bénéfiques, l'intensification des processus de la rhizosphère, la localisation des nutriments pour en augmenter la biodisponibilité (Figure 18) (Zhang et al., 2010), avec pour corollaire une diminution des apports d'engrais. L'impact chimique, physique et biologique de la rhizosphère augmente avec le développement du système racinaire. Sans racine, pas de rhizosphère et pas de rhizodéposition comme carburant pour l'activité racinaire (Hodge et al., 2009).

Le déploiement du système racinaire avec pour conséquence un effet rhizosphérique plus important via l'exsudation racinaire et la diminution du pH pourrait améliorer la biodisponibilité de nutriments peu solubles comme le phosphore et les micronutriments (fer). Le développement des racines est très sensible aux variations de l'offre et de la distribution des éléments nutritifs dans les sols (Ford et Lorenzo, 2001). Hodge et al., (2009) soulignent la rapidité avec laquelle les racines prolifèrent dans des zones enrichies en phosphore et en azote. Mc Grath et al., (2001) signalent une prolifération des racines d'espèces agro forestières et forestières dans des microsites enrichis en phosphore. Weligama et al., (2008) mesurent une augmentation de la prolifération racinaire du blé associé à une alcalinisation d'un sol acide. En plus d'une prolifération racinaire, la réponse à des zones enrichies inclut aussi une stimulation de l'absorption racinaire (Robinson, 2001).

Ainsi, le facteur limitant n'est pas la racine (absorption et prolifération) mais bien la richesse en éléments nutritifs des sols. Robinson (2001) émet l'idée de maximiser l'absorption

de P et N à partir de zones de sols enrichies en N et P et, ainsi, peut être compensé l'approvisionnement irrégulier de ces nutriments à partir de l'ensemble du système racinaire. Des chercheurs chinois ont pu obtenir des résultats intéressants par la manipulation de la rhizosphère. L'application localisée d'azote sous forme d'ammonium associée à du phosphore à la rhizosphère de maïs de sols calcaires, pH 8 a amélioré significativement la croissance et la prolifération racinaire du maïs, et a diminué le pH de 3 unités à proximité immédiate des racines (Jing et al., 2010).

Zang et al., (2010) ont montré que l'intégration de la gestion de la rhizosphère dans un système de culture intensif dans le Nord de la Chine a augmenté de 5 à 15% le rendement du maïs pour des variétés à haut rendement et limité les intrants d'engrais par la réduction de 40 à 50% des engrais azotés, et de 33% des superphosphates en raison de la localisation des engrais qui a amélioré significativement la concentration des nutriments dans les zones enrichies du sol.

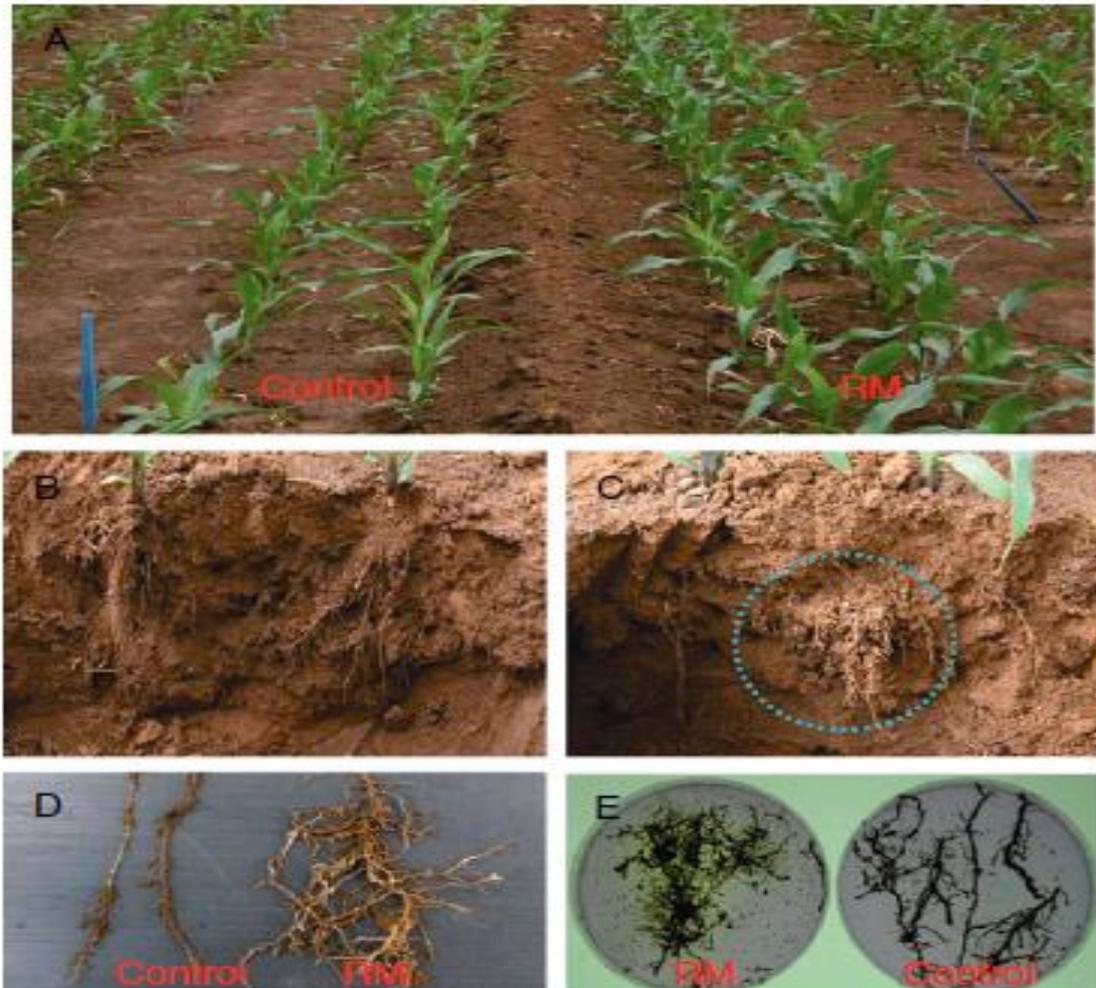


Figure 19 Effet d'un apport localisé de nutriments dans la rhizosphère sur la prolifération racinaire et le développement du maïs. (A) Croissance comparée du maïs sur un sol carbonaté avec le témoin à gauche et le traitement avec apport localisé d'azote et de superphosphate à droite (RM) comme pratique de la gestion de la rhizosphère ; la prolifération racinaire est limitée chez le témoin ; la localisation des engrais a provoqué une prolifération racinaire et une acidification de la rhizosphère ; comparaison de la prolifération racinaire entre le témoin (à gauche) et la rhizosphère de maïs traitée avec des engrais localisés (à droite) (D) ; acidification de la rhizosphère (couleur jaune clair) de la rhizosphère traitée (à gauche) comparativement au témoin à droite (E) (Zhang et al., 2010).

Il est admis que les espèces et les génotypes (Figure 19) diffèrent dans leur capacité et leur efficacité à prélever, à transporter et à utiliser les éléments minéraux (Marschner, 1995). Ainsi, la gestion de la rhizosphère va inclure la sélection d'espèces ou de génotypes basée sur l'efficacité de leurs processus rhizosphériques à tirer partie de sols pauvres en éléments nutritifs, en remplacement de ce qui se fait dans l'agriculture moderne, à savoir une sélection d'espèces à haut rendement mais très exigeantes en engrais.

La manipulation des micro-organismes (micorhyses et bactéries) fait aussi partie de cette stratégie de gestion de la rhizosphère des plantes pour améliorer la productivité agricole dans le cadre d'un développement durable (Ryan et al., 2009).

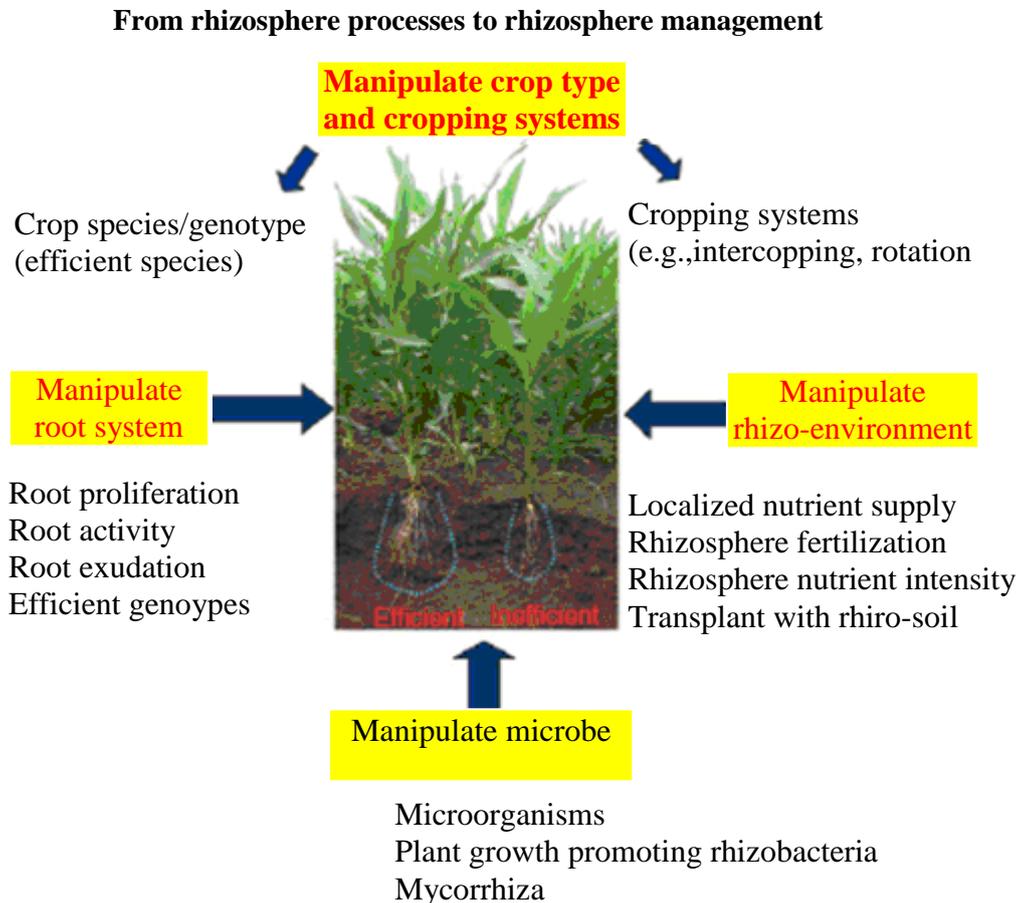


Figure 20 Stratégies pour la gestion de la rhizosphère basées sur la manipulation des principaux constituants et processus de la rhizosphère. La photo ci-dessus montre le développement plus important d'un génotype de maïs plus efficace dans le prélèvement du phosphore en raison d'un système racinaire de grande taille (à gauche).

Une utilisation plus efficace des éléments nutritifs et la productivité des cultures peut être augmenté par la manipulation des interactions entre différentes espèces de cultures intercalaires. Pour exemple, la culture intercalaire d'arachides (*Arachis hypogaea* L.) / maïs (*Zea mays* L.) améliore la nutrition en fer de l'arachide en influençant les processus de la rhizosphère, ce qui suggère un rôle important des phytosidérophores libérés par le maïs carencé en fer (Zhang et al., 2004). Il s'agit de la facilitation de l'acquisition des nutriments par les cultures intercalaires. Inal et al., (2007) soulignent l'importance des cultures intercalaires comme système prometteur de gestion des cultures dans leur contribution à l'amélioration de la nutrition en Zn, P et K des plantes qui est probablement due à la modification de processus biologiques et chimiques dans la rhizosphère.

Pour résumer, le principe de la gestion de la rhizosphère va consister en une mise en œuvre efficace des principales composantes des processus de la rhizosphère, qui incluent la manipulation des systèmes racinaires, acidification de la rhizosphère, exsudation racinaire, association microbienne avec les plantes, interactions dans la rhizosphère des cultures intercalaires, application localisée des engrais, utilisation de géotypes performants dans l'acquisition de nutriments. Les intrants d'éléments nutritifs dans les agros systèmes pourraient être optimisés par une utilisation plus efficace des nutriments par une mobilisation et une acquisition plus importante des nutriments, en maximisant les processus de la rhizosphère (Figure 21) (Zhang et al., 2010).

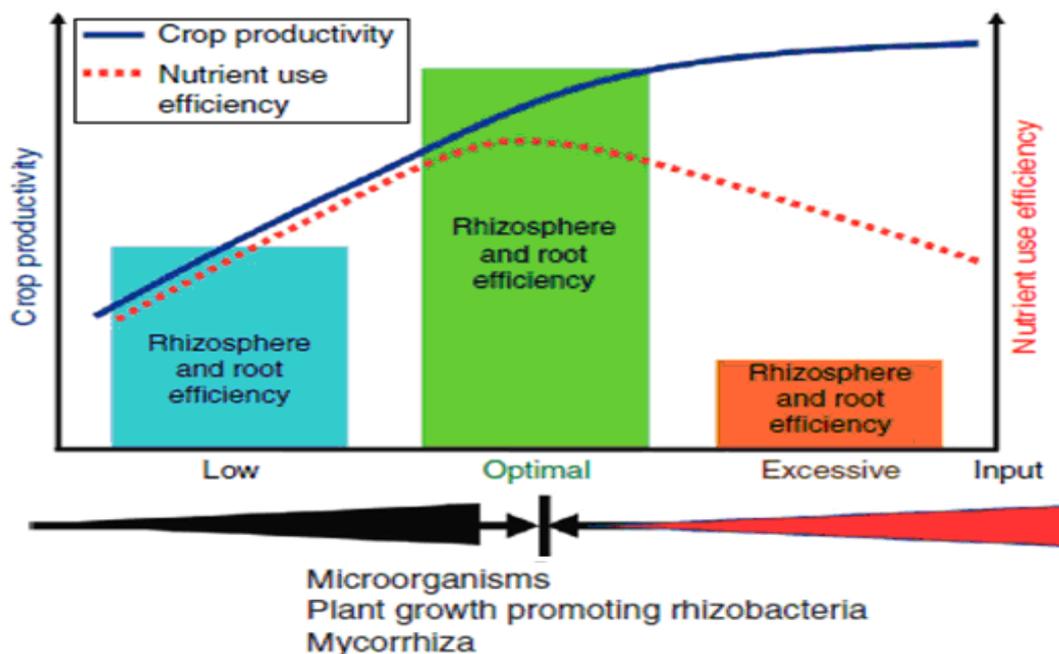


Figure 21 Modèle conceptuel de la gestion de la rhizosphère pour optimiser l'utilisation des intrants de nutriments en maximisant les processus de mobilisation et d'acquisition des éléments nutritifs dans la rhizosphère dans l'objectif d'augmenter la productivité de la culture. La productivité de la culture est limitée en conditions de faibles et de forts intrants. Par contre, au niveau optimal d'apport d'éléments nutritifs, il existe une très bonne efficacité entre les processus de la rhizosphère et le niveau d'apport, par conséquent la productivité s'élève (Zhang et al., 2010).

9. Culture de l'olivier

L'olivier est un arbre à feuillage persistant, à grande longévité, d'environ 150 ans. L'entrée en production se fait à partir de 4 à 5 ans, en bonne condition de développement, il peut atteindre 1,5 à 2m de diamètre (Loussert et Brousse, 1978). Dans les années quatre vingt

dix, près de 98% des olivettes se rencontraient autour du Bassin Méditerranéen. Leur zone de culture s'étendait de la Mer Noire aux contreforts de l'Himalaya (Baldy, 1990; Civantos, 1998). Les dernières statistiques connues font état d'environ 840 millions d'oliviers dans le pourtour de la Méditerranée et de 90 millions dans le reste du monde, ce chiffre est en progression constante. L'oléiculture en Algérie est principalement concentrée dans la région du Nord jusqu'à 800 à 1000 m d'altitude. Le verger oléicole national est implanté dans les grandes régions du pays avec des concentrations différentes, répartis en trois zones principales : la région du centre (Béjaïa, Tizi-Ouzou, Bouira et Boumerdes), Mlila, suivie de la région de l'Ouest (Sidi-Bel-Abbes, Mascara, Relizane, Tlemcen, Mostaganem et Saïda).

Les oliveraies de la wilaya de Tizi-Ouzou se localisent essentiellement sur les collines. Le matériel végétal de ces oliveraies est constitué en majorité par la variété Chemlal associée aux variétés Bazarda et Bouchouk formant ainsi un ensemble inter fertile. Les oliviers sont issus en grande partie du greffage d'oléastre, avec un âge souvent supérieur à 50 ans.

9.1 .Exigences écopédologiques

Les températures optimales au développement de l'olivier se situent entre 12 et 20°C (Maillard, 1975). L'olivier est l'un des arbres le plus plastique vis-à-vis de l'alimentation en eau : il se rencontre aussi bien dans des régions qui reçoivent plus de 2mètres de précipitations que dans des régions qui reçoivent moins de 200mm de pluie par année (Baldy, 1990). Avec 600 mm de pluie bien répartie, l'olivier végète et produit normalement. Entre 450 et 600mm, la production est possible à condition que les capacités de rétention en eau du sol soient suffisantes. L'olivier peut résister à de sévères sécheresses mais avec une activité physiologique (Greven et al., 2009) et photosynthétique (Boussadia et al., 2008) fortement réduites. Baldy (1990), précise que si les déficits hydriques sont importants en automne et en hiver, ils affecteront non seulement la récolte de l'année mais aussi les récoltes ultérieures. L'olivier a une grande capacité à s'adapter à différents types de sols (Brousse et Loussert, 1978). L'olivier est peu exigeant en matière de sol, il pousse pratiquement tout autant sur des sols siliceux que calcaires (Civantos, 1998). Mais certaines caractéristiques du sol lui sont plus favorables que d'autres. La profondeur minimale du sol nécessaire à l'olivier est de 1 à 1.5m (Brousse et Loussert, 1978). Le pH peut aller jusqu'à 8 à 8.5 avec, cependant, des risques d'induction de carence en fer et en magnésium (cas des sols calcaires). Soyergin et al., (2002) considèrent que l'olivier présente un bon développement sur des sols contenant des

taux de matière organique supérieurs à 10‰, alors que Freeman et Carlson (1994) considèrent qu'un niveau de 15‰ reste faible.

Le potassium est l'élément qui est le plus difficile à maintenir à un niveau adéquat pour le développement de la récolte en ce qui concerne la culture de l'olivier (Martinez et Sanchez, 1975). Cela est dû, d'une part, au fait que les 2/3 du potassium de la plante sont localisés dans le fruit à l'époque de la cueillette et, d'autre part, à la faible mobilité du potassium dans les sols et la grande facilité de ceux-ci pour fixer les engrais potassiques (Denis, 2000). Gargouri et Mhiri (2002) proposent des valeurs de potassium du sol ramenées au taux d'argiles, optimales, de 80 mg.kg⁻¹ lorsque le taux d'argiles est inférieur à 15% et de 150 mg.kg⁻¹ dans d'autres cas. Chez cet arbre, le potassium revêt une importance majeure, il intervient dans la nutrition de l'arbre, notamment, en période de pleine croissance végétative, pendant la floraison et au moment du grossissement des fruits. Il favorise l'épanouissement des fleurs, améliore la saveur et la couleur du fruit (Argenson et al., 1999). Le potassium augmente la résistance au froid et aux parasites (Loussert et Brousse, 1978). Il intervient dans l'économie de l'eau (Arquero et al., 2006). Les olives présentent des besoins élevés en potassium. Enfin, et ce n'est pas le moindre de ces rôles, le potassium améliore le rendement en huile (Figure 22) (Sopib, 1989).

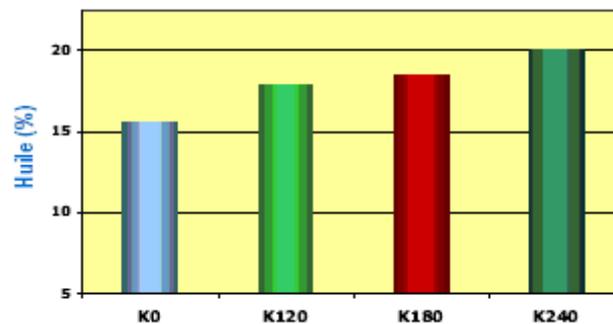


Figure 22 Teneur en huile et doses de sulfate de potassium (Sopib, 2009).

Le phosphore joue un rôle déterminant sur le développement racinaire, il renforce l'enracinement et la vigueur des tissus végétaux. Pour l'olivier, cet élément est indispensable à la division cellulaire et au développement des tissus méristématiques (Argenson et al., 1999). Les besoins les plus importants en phosphore pour l'olivier se situent lors des processus de floraison et de développement des fruits (Boulila, 2001). Hartmann et al., (1966); Recalde, (1975); proposent des valeurs optimales pour le P₂O₅ assimilable comprises entre 20 et 280mg.kg⁻¹. Toutefois ces valeurs sont basées sur des résultats d'analyses obtenues avec

différentes méthodes (Gargouri et al., 2006). Gargouri et Mhiri (2002) ont déterminé un seuil critique de 8mg.kg^{-1} de phosphore assimilable pour l'olivier cultivé en Tunisie.

9.2. Fertilisation de l'olivier

Il faut distinguer deux modes de fertilisation en fonction de la conduite de la culture de l'olivier, en pluviale ou en irrigué. Dans les oliveraies non irriguées les doses recommandées pour l'azote sont de 0,6 à 1kg d'azote par arbre et par an (Ferrero et al., 1986). Pour des vergers en irrigué, Hidalgo et Pastor (2005) recommandent des doses de 0,75 à 1kg d'azote par arbre et par an. Fernandez Escobar (2004) estiment que des doses de 0,5 à 1kg d'azote par arbre et par an sont suffisantes pour corriger les déficiences en azote dans la majorité des oliveraies. Cependant Morales Siloro et al., (2009) considèrent que la dose de 1kg d'azote par arbre et par an est trop élevée et constitue un risque de contamination des nappes par les nitrates. Ils proposent une dose de 0,4 kg d'azote par arbre et par an, ce qui semble être la dose la plus appropriée pour la qualité de l'huile et de l'olive de table.

Restrepo Diaz et al., (2008a) ont comparé deux modes d'application des engrais potassiques : un apport au sol qui consistait en l'application de 1kg de K_2SO_4 par arbre et par an ou une pulvérisation foliaire de 10,5g de K par litre à quatre stades de développement. Ces auteurs concluaient que le mode d'apport au sol ou en pulvérisation n'avait pas d'effet sur l'efficacité de la fertilisation. Par contre pour la fertilisation azotée Fernandez Escobar et al., (2009) indiquent que la combinaison de la fertilisation au sol et de la pulvérisation de l'urée a un effet significatif sur le rendement et diminue la quantité d'engrais azotés apportés au sol et limite la pollution des nappes par les nitrates. Ces auteurs recommandent de pratiquer une fertilisation azotée lorsque la concentration en azote foliaire de l'année précédente est en dessous du niveau de déficience.

Walali et al., (2003) préconisent pour le phosphore, 0,8 à 1kg de P_2O_5 par arbre soit en moyenne 2kg de superphosphates à 46% par arbre. Arquero et al., (2002) préconisent l'utilisation du monopotassium de phosphate à des concentrations comprises entre 2 et 4% en pulvérisation foliaire dans les zones où le manque d'eau dans les horizons de surface des sols réduit l'absorption des nutriments.

L'olivier est sensible à la carence en bore. Sa culture requiert des niveaux importants de bore (Hartmann, 1996), ainsi l'apport de Bore sous forme de Borax est appliqué dans la plupart des oliveraies (Fernandez Escobar et al., 1999).

La conduite de la fertilisation de l'olivier est rendu d'autant plus difficile que cet arbre est soumis à une forte alternance. L'olivier, comme d'autres espèces fruitières est sujet à une alternance de la production (Jordao et al., 1993). L'alternance est une fluctuation de la production entre une année de forte production (année "on") suivie d'une année de plus faible production (année "off") (Rosentock et al., 2010). Benrouina et Trioui (2002) observent une alternance fréquente et considérable dans la production d'olives de la variété Chemlal en Tunisie. Les chutes de rendement peuvent être importantes. Sibbett et Ferguson (2002), mesurent un rendement de 75,8Kg d'olives/olivier en année "On" mais seulement de 12,9Kg d'olives/olivier pour les arbres en année "Off". L'année suivante, les oliviers qui étaient en année "On" et qui sont en année "off" ont produit 23,6 kg d'olives /olivier et les arbres qui étaient en année "Off" et sont donc en année "On" ont produit 111,6kg d'olives/olivier. Toujours selon ces auteurs, une teneur optimale en éléments nutritifs de la feuille de l'année précédente induit un bon rendement l'année suivante. Ainsi, pour réduire les effets de l'alternance, une gestion efficace des engrais particulièrement des suppléments d'azote, de potassium et de bore peut fournir un bon outil de la gestion de l'alternance chez l'olivier.

10. Culture du figuier

Avec l'olivier, le figuier, représente les deux arbres symboles de l'arboriculture fruitière en Kabylie. Le figuier 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 d'arbres sont concentrés dans les seules régions de Tizi-Ouzou, de Bejaia et de Bouira. 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).

10.1. Exigences éco pédologiques

Les exigences éco-pédologiques du figuier ont été résumées à partir de l'ouvrage de Vidaud et al., (1997) : 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 présence de calcaire. Bien que résistant à la sécheresse, une certaine fraîcheur est favorable au développement des fruits. On le retrouve

dans tous les sols, argileux, sableux, calcaires, humides à excès mais non marécageux. Il est souvent considéré comme le plus robuste de tous les arbres fruitiers (Bretaudeau et Faure, 1991). Le figuier 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 et al., 2008).

11. Problématique

Les oliveraies de Kabylie sont des agro systèmes à faibles intrants dont les sols sont souvent déficients en éléments nutritifs. L'olivier est une espèce fruitière souvent considérée comme rustique qui se contente souvent de sols à fortes contraintes. Dans la littérature, de nombreux travaux sur la physiologie de cette espèce ou bien sur les conditions édaphologiques qu'elle exige existent. En revanche, bien peu sont disponibles sur la zone autour des racines, la rhizosphère. L'adaptation de cette espèce fruitière à des sols généralement déficients en éléments nutritifs pourrait trouver, en partie, son explication dans une meilleure valorisation de la ressource sol par la racine et les micro-organismes qui lui sont associés.

Le potassium, élément majeur et indispensable du rendement, limite sévèrement la production agricole sous climat méditerranéen. Des études récentes (Turpault et al., 2005,2007), Calvaruso et al., (2011) sur le fonctionnement de la rhizosphère ont montré que l'on devait prendre en compte la plante dans le déterminisme (Arvieu, 1998) de la biodisponibilité du potassium. La nature des modifications dans la rhizosphère peut être d'ordre physique, chimique et minéralogique. L'aspect minéralogie des sols est primordial dans notre travail. En effet nous nous intéressons à l'élément potassium dont la dynamique et la biodisponibilité dans les sols sont intimement liées à la quantité et à la nature des argiles. L'amplitude des changements dans la rhizosphère peut aussi varier en fonction des propriétés des sols. Une meilleure connaissance de ces processus associée à des indicateurs de développement et de croissance du végétal (biomasse végétale, production, concentration foliaire du potassium) permettrait de mieux comprendre les interactions de l'olivier à l'interface sol/racine et leurs conséquences sur la nutrition minérale et pour ce qui nous concerne la nutrition potassique de cet arbre.

11.1. Hypothèses de travail

Nos hypothèses de travail sont les suivantes :

La racine de l'olivier *Olea europea* L. induit des modifications physiques, chimiques et minéralogiques dans le sol à sa proximité immédiate et ceci en vue de s'adapter aux contraintes de son environnement. L'objectif de ce travail est de déterminer i) l'effet du statut initial des sols, ii) des pratiques culturales (fertilisation), iii) de comparer la rhizosphère de l'olivier à celle d'une autre espèce méditerranéenne comme le figuier.

11.2. Démarche

Ces modifications vont donc dépendre :

Du statut initial des sols

Le comportement de la racine diffère selon quelle est en présence de sol riche ou déficient en un ou plusieurs nutriments, calcaire ou non, à pH neutre ou acide. En faisant varier le statut initial des sols sous oliveraies nous pourrions évaluer la nature et l'amplitude des différentes modifications chimiques et minéralogiques dans la rhizosphère de l'olivier. La réponse de la racine de l'olivier aux contraintes induites par les sols (déficience en potassium, pH...) pourrait ainsi indiquer une capacité de l'olivier à s'adapter au milieu qui lui est proposé.

Des techniques culturales (fertilisation)

Des études au champ sur l'effet d'apport d'engrais sur une culture de maïs Volonté et al., (1998), d'un amendement de boues résiduaires sur des espèces forestières (Caravaca et al., 2003) indiquent l'existence d'interaction positive racines / sol dans ces milieux enrichis en éléments nutritifs. La racine améliore l'effet des apports d'engrais ou celui d'amendement organique. Le dispositif de fertilisation avec un mode d'apport d'engrais potassiques, phosphatés et azotés en localisé que nous avons utilisé sur des oliviers nous permettra de valider ou non cette hypothèse. Le corollaire serait une meilleure gestion des éléments nutritifs apportés, en particulier, le potassium.

De l'espèce

Les processus rhizosphériques jouent un rôle majeur dans l'acquisition des nutriments et déterminent en partie l'adaptation de l'espèce aux contraintes de l'environnement. La comparaison de la rhizosphère de l'olivier et du figuier sur des sols similaires fournirait des

indications quant à l'adaptation de ces deux espèces à leur environnement immédiat. La conséquence serait une sélection plus judicieuse de l'espèce la mieux adaptée à tel type de sol. La meilleure interaction sol/racine peut être retenue dans l'implantation de vergers.

B- Matériels et méthodes

1. Présentation de la zone d'étude

1.1. Géologie des régions d'étude

Les stations situées dans la willaya de Tizi-Ouzou (Tableau 4) font partie du Bassin versant du Haut Sébaou. La lithologie de la région est dominée par des formations géologiques imperméables, où on relève une large répartition du socle cristallophyllien entouré d'un ensemble sédimentaire composé essentiellement d'argiles, de marnes, de calcaires et de flysch (Yakoub, 1996). Le socle est constitué de gneiss, micaschistes, calcaire cristallin et schistes datés du précambrien. On trouve également des roches intrusives dans la série métamorphique comme les pegmatites, granulites et roches granitoïdes (Raynold, 1976). La géologie de la station située dans la région de Bouira (Tableau 4), Bouira, est constituée par des alluvions anciennes de plateaux et cônes de déjection (Jacob et Ficheur 1911).

1.2. Climat

Le climat est l'une des composantes du milieu au même titre que le sol. Il exerce un rôle déterminant dans la formation des sols, dans la localisation et le développement des végétaux. Le climat de nos régions d'étude est de type méditerranéen. Celui-ci se caractérise par la sécheresse de la saison estivale, des hivers relativement humides et le faible nombre de jours pluvieux avec des précipitations torrentielles à grandes irrégularités interannuelles. Afin de caractériser le climat de nos zones d'études, nous avons utilisé les données climatiques de l'Office Nationale de Météorologie (O.N.M.) et les paramètres retenus sont les précipitations, les températures et l'évapotranspiration sur une période de 10 ans.

1.2.1 Pluviométrie

La pluviométrie prend une importance considérable en région méditerranéenne. Son insuffisance (ou la période de sécheresse étendue) représente l'un des cas les plus typiques de facteur limitant pour la végétation. L'origine des pluies en Algérie est plutôt orographique. Dans la région de Tizi-Ouzou les précipitations se présentent sous formes d'averses importantes durant la période de novembre à janvier atteignant un maximal au mois de décembre avec une valeur de 158,2 mm, quant au minimum, il est enregistré au mois de juillet avec une valeur de 1.8 mm (Tableau 5).

Les précipitations enregistrées pour la station de Bouira sont présentées dans le tableau 2. Pour cette station le maximum de précipitations est enregistré au mois de décembre avec une valeur de 98,4 mm, le minimum au mois de juillet avec une valeur de 4,4 mm.

Tableau 5: moyenne des précipitations mensuelles de Tizi-Ouzou pour la période de 1997–2007.

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. 2007).

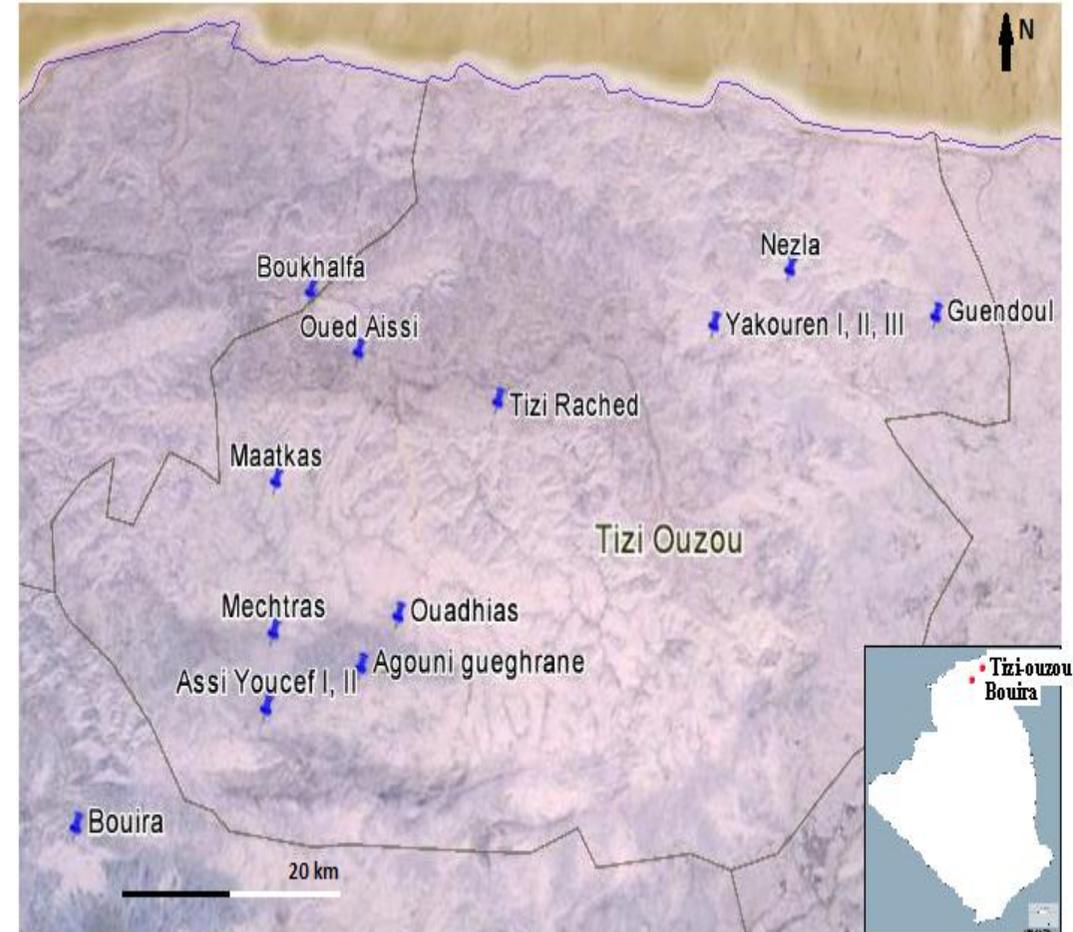
Tableau 6 : moyenne des précipitations mensuelles de Bouira pour la période de 1997–2007

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. 2007).

-Tableau 4 : principales caractéristiques des 17 stations

SITES (abbr)	Coord.	Altitude (m)	Matériau parental	rente
Tizi-Rached (Tiz)	36°41' 15. 71"N 4°12' 39. 27" E	216	Grés	15%
Mâatkas (Mat)	36°39' 49. 41' N 4°03'14. 53"E	496	Schistes	20%
Mechtras plaine (Mep)	36°32' 34. 51"N 4°00' 49' 98"E	404	Glacis d'accumulation	0%
Yakouren I (YakI)	36°46'32. 09"N 4°26'42. 07"E	327	Grés numidiens intercalés d'argiles	30%
Yakouren II (YakII)	36°50'19. 22" N 4°29' 59. 17"E	163	Grés numidiens	25%
Nezla (Nez)	36°47'04.42''N 4°13'40.00''E	492	Alluvions anciennes	5%
Assi-Youcef I (Ass1)	36°29' 37. 58"N 4°00' 41. 14"E	814	Glacis d'accumulation	10%
Ouadhia (Oud)	36°42' 30. 51"N 4°04' 17. 77"E	100	Schistes	5%
Mechtras colline (Mec)	36°32' 54. 41"N 4°00' 47. 25" E	459	Schistes micacés	25%
Agouni-gueghrane (Ago)	36°30' 50. 03"N 4°07' 06. 14"E	625	Schistes et micro- schistes	30%
Assi Youcef II (AssII)	36°29' 51. 57"N 4°00' 17. 50"E	790	Colluvions calcaires	0%
Oued-Aissi (Oua)	36°42'30. 51"N 4°04' 17. 77"E	100	Calcaires	30%
Bouira (Bou)	36°25'22.92 ''N 3°50'58.62''E	373	Alluvions anciennes	0%
Guendoul (Guen)	36°44'20.63''N 4°13'05.91''E	546	Calcaires	10%
Boukhalfa (Bouk)	36°44'48. 3"N 4°01'09. 11"E	81	Marnes	5%
Yakouren III (YakIII)	36°47'16. 67"N 4°27' 36. 88"E	161	Argiles	0%
Tizi Rached II	36°41' 20.87"N 4°07' 43. 43" E	240	Calcaires	5%

**Figure 23** localisations des différents sites d'études.

1.2.2 Températures

Les températures moyennes mensuelles des maximales, des minimales et des moyennes pour la région de Tizi-Ouzou sont illustrées dans le tableau 7. Les mois les plus chauds sont juillet et août, respectivement, avec une température moyenne maximale de 39 °C. Le mois de janvier est le mois le plus froid avec une température moyenne minimale sur de 10 ans de 7,1°C. Pour la station de Bouira (Tableau 8), la température minimale mensuelle (m) est mesurée durant le mois de février avec 4,2°C, alors que la température maximale mensuelle (M) est enregistrée au mois de juillet avec une valeur de 37,2°C.

Tableau 7 : répartition des températures mensuelles maximales, minimales moyennes de la région de Tizi-Ouzou.

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Moyenne 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
S = (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. 2007).

Tableau 8 : répartition des températures mensuelles maximales, minimales moyennes de la région de Bouira.

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Moyenne 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
S = (M+m)/2	25,6	21,1	14,0	11,1	9,4	9,8	13,7	16,0	21,1	26,7	29,6	30,2	19

(Source : O.N.M. 2007)

M : moyenne des maxima mensuels ; m : moyenne des minima mensuels ;

M+m/2 : moyennes mensuelles

1.2.3. Evapotranspiration

L'évapotranspiration moyenne annuelle est de l'ordre de 1072,5 mm pour Tizi-Ouzou et de 998 mm pour Bouira. Elle est maximale en juillet et août, 209,3 mm et 202,9 mm ; 196,4 et 181,4 respectivement pour Tizi-Ouzou et Bouira. Pour la station de Bouira les pluies ne satisfont pas à la demande de l'évapotranspiration, entraînant un important stress hydrique qui

coïncide avec les périodes de fructification et de maturation des olives qui sont sensibles aux conditions climatiques.

Tableau 9 : répartition des évapotranspirations mensuelles de la région de Tizi-Ouzou.

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Total
ETP (mm)	129,6	87,96	35,89	19,60	16,31	19,16	37,36	54,24	97,56	163	209,3	202,9	1072,5

Tableau 10 : répartition des évapotranspirations mensuelles de la région de Bouira.

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Total
ETP (mm)	121,4	77,13	29,3	18,06	13,32	14,18	34,0	49,8	96,21	157,0	196,4	191,4	998

1.2.4 Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gausсен

Pour mieux caractériser le climat de nos régions nous avons tracé le diagramme ombrothermique qui nous a permis de déterminer la durée de la saison sèche et son intensité (Figure 24). Etablissant une relation entre les précipitations moyennes mensuelles et la température moyenne du mois, Bagnouls et Gausсен (1953), considèrent qu'un mois est sec quant le total des précipitations (en mm) est inférieur au double de la température en °C c'est-à-dire $P < 2T$.

2. Choix des parcelles d'échantillonnage

L'objectif de la campagne d'échantillonnage a été de réunir une gamme de sol à statut initial différencié. Dans une première étape les sites étudiés ont été sélectionnés sur la base du substrat géologique et de la pente. Dans une seconde étape, les deux facteurs principaux influençant le choix ont été le type de sol, et la texture. Cette étude a été menée sur 17 sites situés au Nord de l'Algérie, sur un transect Nord-.Sud de 52 km correspondant à un climat allant du subhumide au semi aride.

2.1. Vergers d'oliviers

Les 17 vergers d'oliviers étudiés sont de la variété Chemlal, d'âge moyen de 50 ans, de densité moyenne d'environ 100 à 150 arbres /ha. Les oliviers sont en pleine production. Cette variété a été retenue pour sa fréquence en Algérie.

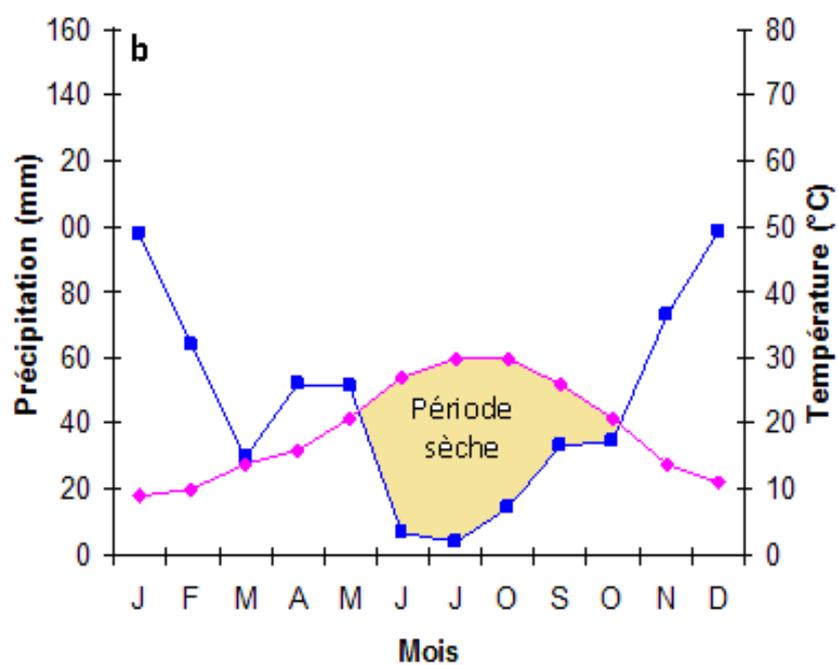
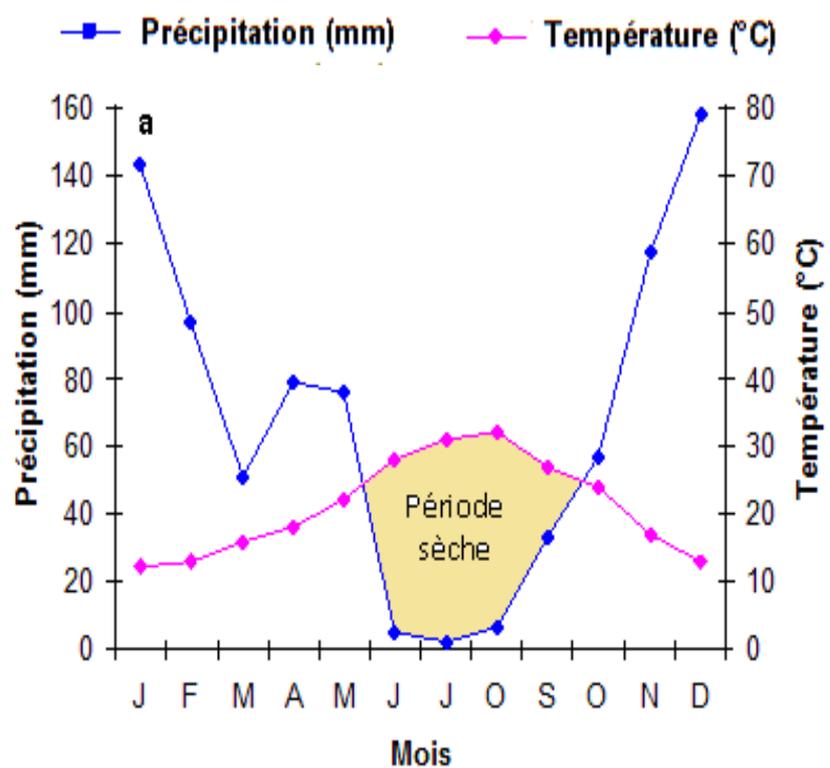


Figure 24 diagrammes ombrothermiques de Bagnouls et Gaussen de la région de Tizi-Ouzou (a) et de la région de Bouira (b)

2.2. Vergers de figuiers

Ils sont au nombre de quatre et sont contigus aux vergers d'oliviers des stations de Nezla, Tizi-Rached, Guendoul et Bouira. Les figuiers sont d'un âge moyen de 40 ans. La densité moyenne des vergers est de 100 arbres par hectare.

Les oliveraies et les figueraies sont conduites en extensif, sans apport d'engrais, sans irrigation. Pour certaines, seul un labour automnale est pratiqué. Les sols sont peu remaniés et la végétation naturelle était constituée de graminées.

2.3. Sols

Deux types d'échantillonnage ont été réalisés, le premier consiste à prélever le sol global et le sol rhizosphérique (Courchesne et Gobran, 1997). Le second consiste à prélever trois fractions de sols ; le sol global, le sol rhizosphérique et le rhizoplan (Turpautl et al., 2007).

2.3.1 Echantillonnage du sol global et du sol rhizosphérique

L'échantillonnage du sol est réalisé au cours du repos hivernal de l'olivier et du figuier, de la mi-décembre à la mi-janvier. La méthode d'échantillonnage est celle de l'échantillon composite unique. Il a porté sur le sol global et le sol rhizosphérique de 10 oliviers par verger. Les prélèvements sont faits en diagonale, sur 10 arbres par verger, aux quatre points cardinaux autour de chaque arbre. Les racines des arbres étaient localisées à la périphérie de la couronne principalement dans les 30 à 40 premiers centimètres du sol. A la périphérie de la couronne, un échantillon volumineux de sol est prélevé dans les 30 premiers centimètres de sol. Les racines et le sol accolé à l'ensemble du système racinaire sont récoltés. Ces racines 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 (sol global). Un échantillon moyen composite de sol global et un autre de sol rhizosphérique est constitué en mélangeant les prélèvements de sols globaux et ceux de sols rhizosphériques pour chaque oliveraie et chaque figueraie.

2.3.2. Echantillonnage du sol global, du sol rhizosphérique et du rhizoplan

A la périphérie de la couronne, nous prélevons un échantillon volumineux de sol. Le sol global correspond au sol non accolé aux racines qui tombe et qui est indemne de toute

activité racinaire. Le sol rhizosphérique est obtenu par un léger secouage d'environ 30 secondes des racines fines actives < 5mm sur lesquelles sont accolés des agrégats < à 1cm de diamètre. Le rhizoplan correspond à la fraction qui est fortement accolée aux racines, le rhizoplan est prélevé par un léger brossage des racines, son volume est restreint. Les sols sont séchés au laboratoire, tamisés à 2 mm. Nous avons réalisé ainsi un gradient d'éloignement de la racine : sol global, sol rhizosphérique, rhizoplan.

2.4. Végétal

Dans chaque oliveraie, on procède au prélèvement 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. Analyse des sols et du végétal échantillonnés

3.1. L'analyse des sols

Les échantillons de sol prélevés sont séchés à l'air libre durant deux semaines, puis passés à travers un tamis à maille 2mm de diamètre puis conservés dans un endroit sec à la température ambiante. Les fragments de racines présents dans les sols sont retirés manuellement. Malgré cela des fragments de racines sont probablement restés. Ces échantillons ont fait l'objet des analyses suivantes selon les méthodes standards d'analyse en pédologie (Jackson, 1967) :

* L'analyse granulométrique a été réalisée selon la méthode internationale à la pipette de Robinson après oxydation de la matière organique avec du H_2O_2 et agitation dans une solution d'hexamétaphosphate de sodium. Les argiles, puis les limons fins sont prélevés à la pipette de Robinson. Les sables sont récupérés après siphonage, lavés (pour éliminer les restes d'argiles et limons), séchage, puis séparation par tamisage en superposant les tamis de 200 microns et 50 microns.

* Le pH du sol a été mesuré avec un pH mètre dans de l'eau distillée avec un rapport sol/solution de 1/5.

* Le calcaire total n'a été mesuré que sur les sols globaux par la méthode volumétrique au HCL 1N.

* Le carbone organique a été déterminé par oxydation sulfochromique.

* La capacité d'échange cationique (CEC) par la méthode à l'acétate d'ammonium 1N pH 7.

- * L'azote total a été dosé par la méthode Kjeldahl (1960).
- * L'extraction du potassium immédiatement disponible (K_s) a été réalisée par la mise en suspension des sols dans de l'eau distillée avec un rapport sol /solution de 1/10, puis agitation durant 45mn puis filtration.
- * Le potassium assimilable (KNH_4^+) a été extrait par la mise en suspension du sol dans de l'acétate d'ammonium 1N pH 7 avec un rapport sol /solution de 1/10, agitation durant 1heure suivi d'une filtration (Quemener, 1979).
- * L'extraction du potassium non échangeable ($KHNO_3$) a été réalisée à l'acide nitrique 1N bouillant par l'addition de 25ml d' HNO_3 à 2,5g de terre ou dans le cas des argiles, 2,5g d'argiles naturelles puis porté à ébullition pendant 10 mn suivie d'une filtration (Jackson, 1967).
- * le dosage de potassium a été réalisé par spectrophotométrie à flamme.

Le potassium assimilable correspond au potassium échangeable au NH_4^+ qui comprend principalement le potassium des sites planaires, le potassium interfoliaire des argiles expansibles et une partie du potassium des coins de serrage (edges sites) (Goulding, 1983).

Le potassium non échangeable qui est constitué par le potassium inter foliaire des argiles non expansibles comme les illites, les micas aussi bien qu'une partie du potassium des feldspaths peuvent contribuer de manière significative à la nutrition des plantes dès lors que le potassium assimilable devient insuffisant (Memon et al., 1988; Badraoui et al., 1992 ; Mengel et Uhlenbecker, 1993). Le potassium non échangeable (K_{ne}) correspond au $KHNO_3$ minoré du KNH_4^+ .

Le potassium soluble à l'eau et à l'acétate d'ammonium sont considérés comme facilement biodisponible pour la plante, alors que le K_{ne} est considéré comme plus lentement ou potentiellement biodisponible.

3.2. Méthodes de préparation des argiles pour l'étude minéralogique

Les argiles dans les sols sont liées et constituent des agrégats. Les ciments sont principalement la matière organique et les carbonates de calcium du sol. Afin de pouvoir extraire les argiles, il est nécessaire de détruire ces agrégats et les ciments qui les lient. Pour ce faire deux méthodes sont utilisées, la méthode chimique et la méthode physique.

3.2.1. Méthode chimique

L'échantillon brut de terre est tamisé à sec (tamis de 2mm). La destruction des ciments contenus dans le sol, matière organique et carbonates, est réalisée selon la méthode préconisée

par Robert et Tessier (1974). La destruction de la matière organique se fait par des traitements répétés à l'eau oxygénée électrolytique. Les ciments carbonatés sont détruits par la méthode de destruction classique avec l'HCl dilué, sous pH mètre, en évitant de se situer au-dessous de pH=4. La dispersion des argiles est réalisée par l'utilisation de NaOH N comme dispersant, sous contrôle du pH, qui ne doit pas dépasser 9. La fraction argileuse est obtenue par une série de sédimentations selon les normes de l'analyse granulométrique (loi de Stockes). La fraction fine est prélevée à 10cm de profondeur après décantation de 8 heures, correspondant à la chute des particules de taille supérieure à 2 μm , à une température de 20°C.

3.2.2. Méthode physique

La méthode physique consiste à utiliser une procédure de séparation physique des agrégats du sol, par les ultrasons. Les deux méthodes présentées sont utilisées pour l'extraction des argiles des sols. La première est basée sur les traitements chimiques pour éliminer les ciments qui agrègent les sols. L'utilisation de la méthode chimique peut endommager les minéraux comme les interstratifiés. En effet, l'ajout d'eau oxygénée pour la destruction de la matière organique peut modifier les minéraux argileux (Velde 2001) et l'ajout de dispersants chimiques sont susceptibles de modifier l'occupation des sites interfoliaires des minéraux argileux. La méthode physique permet l'extraction des argiles sans risque de les endommager ce qui permet d'obtenir des argiles très proches de celles qui existent sur le terrain (Singh et Goulding, 1997 ; Barré, 2007).

Nous avons donc opté pour la méthode physique. Nous utilisons une procédure de séparation physique pour récupérer les argiles du sol, 20g de terre sont agités dans 100ml d'eau distillée à 170 rpm durant 16 heures. La suspension est alors soumise à un traitement aux ultrasons (350 J/mL) durant 15 minutes. La fraction argileuse est obtenue par une série de siphonage selon la loi de Stockes. La fraction fine est prélevée à 10cm de profondeur après décantation de 8 heures, correspondant à la chute des particules supérieure à 2 μm . Cette procédure est répétée jusqu'à ce que le surnageant soit clair (absence d'argiles dans la colonne).

3.2.3. Saturation des argiles prélevées

La fraction argileuse < à 2 μm obtenue, est divisé en 3 fractions :

1^{ère} fraction : argile saturée en SrCl_2 .

2^{ème} fraction : argile saturée en KCl.

3^{ème} fraction : argile naturelle, non flocculée.

-Traitement au chlorure de strontium SrCl_2

On ajoute de SrCl_2 0,5 M par fraction de 5ml dans 200 ml de suspension argileuse jusqu'à sédimentation totale des argiles. Après 16h de contact, l'échantillon floculé est rincé à l'eau distillée par agitation suivie d'une centrifugation à plusieurs reprises afin d'éliminer entièrement le chlore. Un test au nitrate d'argent (AgNO_3) est utilisé pour vérifier l'élimination totale de ce sel (Le test au nitrate d'argent AgNO_3 est sensible à des concentrations de 10^{-3} M de chlore)..

- Traitement au chlorure de potassium KCl

Le traitement au chlorure de potassium (KCl 1M est utilisé pour mettre en évidence la présence de minéraux intersstratifiés, et pour différencier les smectites des vermiculites. Le traitement au KCl est similaire à celui du strontium.

-Traitement des argiles naturelles non floculée

Dans cette fraction destinée à l'extraction du KHNO_3 des argiles aucune saturation ionique n'a été effectuée. Les argiles naturelles sont récupérées par centrifugation.

3.3. Analyse des argiles par la diffraction des Rayons X

3.3.1. Préparation des lames

Environ 3 gouttes de suspension d'argiles saturées au strontium et potassium sont déposées sur deux lames de verre et séchées à l'air libre ce qui permet d'obtenir des échantillons orientés pour l'analyse par diffraction des Rayons X.

Les échantillons d'argiles orientés séchées à l'air libre sont analysés par un diffractomètre Rigaku utilisant la radiation au cuivre, au laboratoire de géologie de l'Ecole Normale Supérieure de Paris. Les diffractogrammes sont recueillis avec un pas de $0,05^\circ$ pour un intervalle de temps de 3s dans une fourchette de 4 à $35^\circ 2\theta$. Le choix d'une fourchette de 4 à $35^\circ 2\theta$ permet de vérifier l'existence des minéraux autres que les argiles minéralogiques. Cependant c'est entre 4 et $11^\circ 2\theta$ que sont concentrés les pics les plus intenses des minéraux argileux des sols.

3.3.2. Identification des populations d'argile par modélisation des pics de diffraction

Nous avons utilisé le programme Decomp (Lanson 1997) pour modéliser les pics de diffraction des diffractogrammes des argiles. Barré (2007) décrit brièvement le principe du programme ci-dessous.

Les diffractogrammes obtenus en étudiant les argiles des sols ne présentent pas, en général, de pics bien identifiés auxquels il serait aisé de faire correspondre un type d'argile. Généralement, les pics de plusieurs populations argileuses pures et d'interstratifiés se superposent. Pour pouvoir différencier puis identifier ces différents pics superposés, les programmes de décomposition se révèlent très utiles. Les phénomènes physiques à la base du processus de diffraction peuvent être traduits en équations. Grâce à ces équations, des programmes peuvent calculer l'allure du pic de diffraction (position, largeur à mi-hauteur, intensité) d'une population d'argile dont les caractéristiques ont été choisies par l'utilisateur (composition chimique des feuillets, cations inter- foliaires, nombre de feuillets cohérents composant la cristallite d'argile, quantité relative de chaque type de feuillets constituant l'inter stratification etc...).

Les étapes successives de la décomposition d'un diffractogramme sont les suivantes : La première étape de la décomposition est la soustraction du bruit de fond puis le lissage du diffractogramme. L'utilisateur propose ensuite un certain nombre de courbes en indiquant leurs intensités, largeurs à mi-hauteur, positions et leurs formes. Le programme ajuste alors le diffractogramme calculé correspondant à la somme des différentes courbes proposées par l'utilisateur et le diffractogramme mesuré par diffraction des RX. Si la différence entre les diffractogrammes mesurés et ceux calculés est trop importante, l'utilisateur peut ajouter une nouvelle courbe et demander au programme un nouvel ajustement. La décomposition permettant de reproduire le signal observé en faisant intervenir le moins de courbes possible est retenue. L'utilisateur peut alors noter les positions, les largeurs à mi-hauteur et les intensités de chaque pic après ajustement. La position renseigne sur la nature de la phase argileuse à laquelle le pic correspond.

Six ou sept populations sont généralement présentes : une population d'illite bien cristallisée (WCI) présentant un pic autour de 1 nm, une autre d'illite mal cristallisée (PCI) avec un pic autour de 1.03 nm (le décalage est dû à la présence de quelques feuillets de smectite ou au fait que les particules de PCI présentent un domaine cohérent plus faible), deux populations d'interstratifiées Illite/Smectite, deux populations de kaolinite plus ou moins bien

crystallisées et éventuellement une population peu abondante de vermiculite ou de chlorite. Par convention, la population d'inter stratifiés la plus riche en illite a été appelée I/S et l'autre, plus riche en smectite S/I. La position du pic d'interstratifié illite/smectite des minéraux argileux dépend de l'abondance relative de chaque type de feuillet, plus le contenu d'illite est élevé plus la position en nanomètre est petite.

La figure 25 est un exemple de décomposition d'un diffractogramme d'argile dominé par un pic autour de 1,4 nm (Velde et Barré, 2010). Le diffractogramme initial n'est pas traité (Figure 25a). Le bruit de fond est soustrait des diffractogrammes (Figure 25 b, c, d, e, f, g). Le pic autour de 1,42 nm (pic A) est dominant, par contre celui autour de 1nm (pic D) est moins important, peu intense et étalé ce qui est indiqué par la flèche C. Deux pics sont utilisés pour décrire le matériel illitique : un premier pic C' assez large PCI (poor crystallised illite) pic à faible cristallinité significativement plus large que le second soit le pic WCI (well crystallised illite, pic D'), pic à cristallinité plus forte (figure 25 e). Sur le coté gauche du diffractogramme, le même processus est utilisé. Deux pics sont créés, B et B' (figure 25 c,d et f). Pour terminer la décomposition un pic est créé entre le pic à 1,42 nm et l'illite. Du domaine de l'illite vers celui des petits angles, 5 pics sont créés. Un pic d'illite fortement cristallisé WCI, un pic d'illite moins bien cristallisé PCI (le nombre de feuillets qui diffractent les Rayons X est plus faible), un pic I/S, un pic S/I et un pic de chlorite (Velde et Barré, 2010).

Le centre de gravité du diffractogramme, qui tient compte de la surface et de la position de pic, devrait dépendre de la teneur de l'assemblage d'argile en potassium anhydre et donc peut être une approximation de contenu relatif de potassium. Le centre du gravité (Cg) des diffractogrammes a été calculé comme suit (Barré, 2007 b) :

a_i : la surface du pic i $C_g = \frac{\sum (a_i * \text{pos}_i)}{\sum a_i}$

Pos_i : position du pic i

L'utilisation de cette méthode de décomposition des diffractogrammes des argiles du sol avec le logiciel Decomp a été utilisée pour identifier le cortège minéralogique de sols de prairies par Righi et al., (1995) et Velde (2001) par Barré et al., (2007 b) pour évaluer les modifications des argiles du marais Poitevin liée à l'activité des plantes, par Turpault et al., (2008) pour évaluer l'impact de la rhizosphère d'arbres forestiers sur les argiles du sol.

3.4. Analyse du végétal

Le potassium foliaire a été déterminé sur 1g de poudre végétale de feuilles d'oliviers au laboratoire d'analyses du CNRS Solaize, France. Les échantillons sont minéralisés dans une solution acide et analysés par ICP-AES.

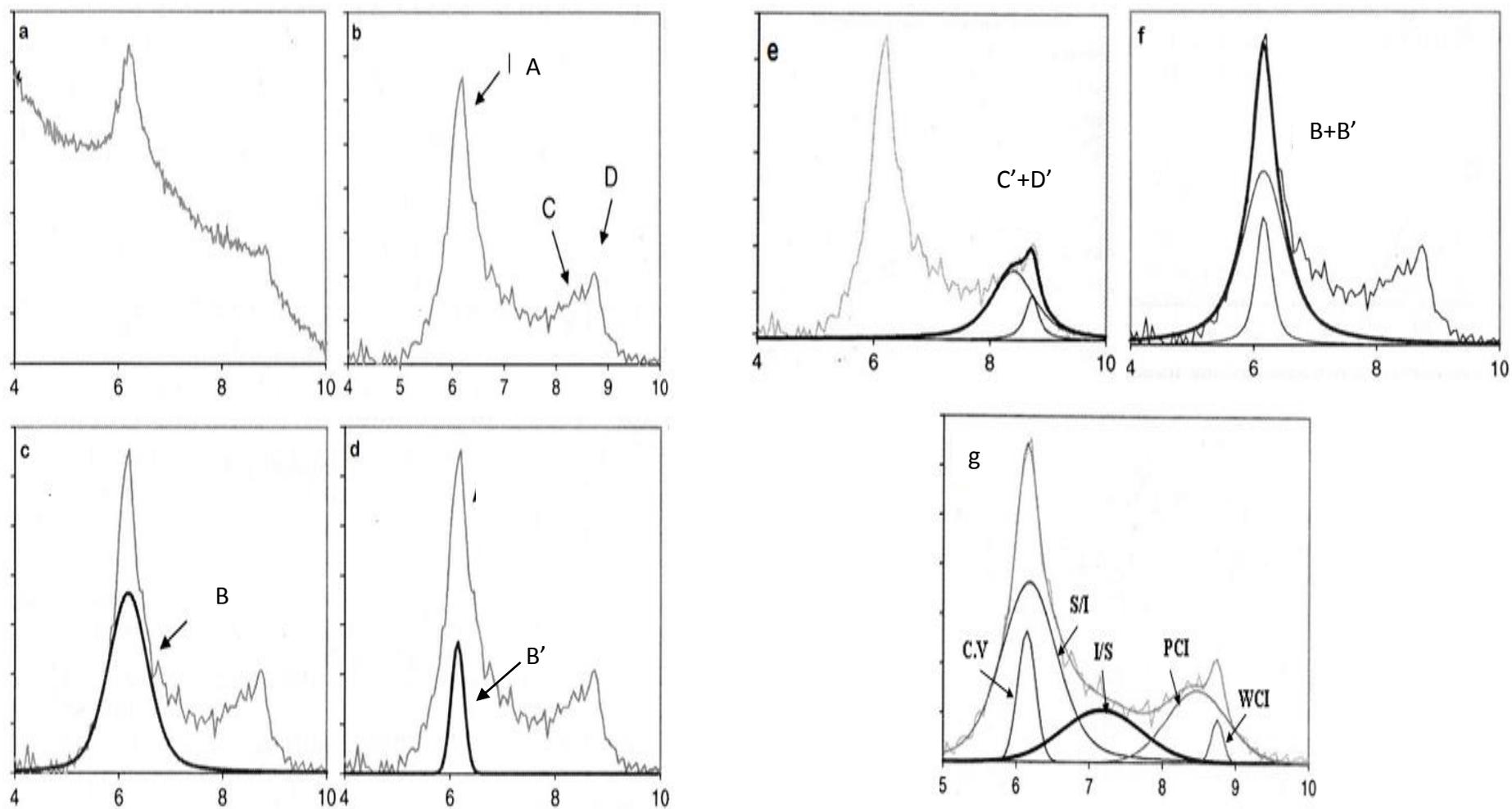


Figure 25 Exemple de décomposition d'un diffractogramme d'argile dominé par un pic autour de 1,4 nm (Velde et Barré, 2010).

C- Statut potassique du sol global et rhizosphérique d'oliveraies du Nord de l'Algérie

Introduction

Dans les agro systèmes à faibles intrants, sans fertilisation et sans amendements organiques les éléments nutritifs biodisponibles sont issus principalement de l'altération des minéraux du sol (Turpault et al., 2009), des dépôts atmosphériques (Calvaruso et al., 2006) et de la décomposition de la matière organique. C'est le cas de la plus grande partie des oliveraies de Kabylie où l'on assiste chaque année à une exportation hors parcelle des éléments nutritifs lors de la récolte des olives, sans restitution, avec pour conséquence un appauvrissement progressif des sols. Braham (1999) mesure des exportations de 11,5 à 30 kg de potassium ; de 1,7 à 4,2 kg de phosphore et de 7 à 15,6 kg d'azote par les fruits, les feuilles et le bois de taille de la variété d'olivier Chemlal. Ceci est d'autant plus vrai pour le potassium, en raison de l'absence de fertilisation potassique et de fortes exportations de cet élément par les olives lors des récoltes. La déficience en potassium a été décrite par Restrepo-Diaz et al., (2008) comme l'un des facteurs limitants de la production oléicole même lorsque les vergers sont cultivés sur des sols suffisamment pourvus en potassium. Ce nutriment est vital sous climat méditerranéen, il induit une résistance des plantes au stress hydrique, cette dernière entraînant un accroissement des besoins des cultures en cet élément (Cakmak, 2007).

En Kabylie du Nord, ainsi que dans d'autres régions du monde, la déficience en potassium des sols est rarement corrigée par une fertilisation potassique en raison du manque d'information des agriculteurs sur la fertilité des sols et le coût prohibitif des engrais (Romheld et Kirkby, 2010). Dans ces régions, il est important de mieux connaître le statut potassique des sols afin d'améliorer la production agricole et sa qualité (Cakmak, 2010).

Le potassium existe sous différentes formes dans les sols. La plante prélève principalement le potassium à partir du pool assimilable qui regroupe le potassium soluble, le potassium échangeable. Le potassium non échangeable peut aussi contribuer à l'alimentation en potassium des plantes (Hinsinger, 1998).

La plante prélève le potassium à proximité immédiate des racines dans une zone appelée rhizosphère. Dans cette zone, l'activité des racines et celle des micro-organismes qui lui sont associés améliore la biodisponibilité des éléments nutritifs (Hinsinger, 1998 ; Hinsinger et al., 2005).

Il est généralement admis que le prélèvement de potassium par les plantes conduit à un appauvrissement en potassium du sol à proximité immédiate de la racine (Jungk et Classen 1986 ; Hinsinger 1998, 2011).

Toutefois, plusieurs auteurs indiquent que la biodisponibilité des éléments augmente dans la rhizosphère (Marshner 1995 ; Grayston et al., 1996, Hinsinger et al., 2009). En particulier, la concentration en potassium et son assimilabilité augmente dans la rhizosphère (Bagayoko et al., 2000 ; Turpault et al., 2005, 2007 ; Dinesh et al., 2010). Cette augmentation en potassium est parfois confirmée par une quantité plus élevée de feuillettes d'illites (feuillet de minéral qui se referme à 1mm par la fixation d'ion potassium, Barré et al., 2007 b) dans la rhizosphère comparativement au sol global.

Malgré l'importance économique de la culture de l'olivier, le statut potassique des sols d'oliveraies est peu documenté particulièrement dans les régions méditerranéennes du Nord de l'Afrique. Le sol rhizosphérique où a lieu l'absorption du potassium reste peu étudié.

Cette étude tente de pallier à ce manque d'information par la détermination du statut potassique du sol global et rhizosphérique de 16 sites du Nord de la Kabylie et évaluer si le statut potassique des sols est en relation avec le potassium foliaire.

Nous avons testé les hypothèses suivantes :

i) Les sols de la Kabylie du Nord occupés par les oliveraies sont déficients en potassium ; ii) La déficience est moins sévère dans le sol rhizosphérique comparé au sol global ; iii) Lorsque ces sols sont pauvres en potassium, les olives sont carencées en potassium.

1 .Matériel et méthodes

1.1. Description des sites

Cette étude a été menée sur 16 sites situés en Kabylie au Nord de l'Algérie, sur un transect Nord-Sud de 52 km, correspondant à un climat allant du subhumide au semi aride. Les 16 vergers d'oliviers de la variété Chemlal, d'âge moyen de 50 ans, de densité moyenne d'environ 100 à 150 arbres /ha sont en pleine production. Cette variété a été retenue pour sa fréquence en Algérie, variété typique de la Kabylie. Les sites étudiés ont été sélectionnés sur la base du substrat géologique, de la pente et du type de sol (Tableau 11). Les sites retenus sont assez représentatifs des oliveraies de la région. Les sols sélectionnés sont sur matériel parental varié ceci dans le but d'obtenir des échantillons de sol à statut initial différent.

Les régions d'étude se trouvent dans des conditions favorables au développement de la culture de l'olivier; à savoir un climat qui présente des températures dont l'intervalle concorde et répond aux exigences de l'olivier de 7 à 37°C et qui coïncide avec ses stades phénologiques. La pluviométrie moyenne enregistrée est d'une valeur de 826,2 mm/an pour Tizi-Ouzou et de 560.5 mm/an pour Bouira respectivement durant la décennie 1996-2006. Les besoins en eau de la culture de l'olivier sont estimés à 600 mm/an (Loussert et Brousse, 1978). Le maximum de pluies est enregistré au mois de décembre et le minimum au mois de juillet pour les deux régions. Le mois d'août est le mois le plus chaud pour la région de Tizi-Ouzou et juillet pour Bouira respectivement avec des moyennes de 39 et 37,2 °C, janvier est le mois le plus froid avec une moyenne de 7,1 °C pour TiziOuzou et février de 4,2 °C pour Bouira.

L'évapotranspiration moyenne annuelle est de l'ordre de 1072 mm pour Tizi-Ouzou et de 998,16 mm pour Bouira Elle est maximale en juillet et août, 209,3 mm et 202,9 mm ; 196,4 et 181,4 mm respectivement pour Tizi-Ouzou et Bouira. Les pluies ne satisfont pas à la demande de l'évapotranspiration. Le climat est de type méditerranéen à hiver froid et été chaud avec une saison sèche d'une durée d'un peu plus de 3 mois pour Tizi-Ouzou et de 4 mois pour Bouira entraînant un important stress hydrique qui coïncide avec les périodes de fructification et de maturation des olives qui sont sensibles aux conditions climatiques. Les oliveraies sont conduites en extensif, sans apport d'engrais, sans irrigation. Pour certaines, seul un labour automnale est pratiqué. Les sols sont peu remaniés et la végétation naturelle était constituée de graminées.

1.2. Echantillonnage des sols et du végétal

L'échantillonnage du sol est réalisé au cours du repos hivernal de l'olivier, à la récolte de la mi-décembre à la mi-janvier. La méthode d'échantillonnage est celle de l'échantillon composite unique. Il a porté sur le sol global et le sol rhizosphérique de 10 oliviers par verger. Les prélèvements ont été faits en diagonale sur 10 arbres par verger aux quatre points cardinaux autour de chaque arbre.

A la périphérie de la couronne, un échantillon volumineux de sol est prélevé dans les 30 à 40 premiers centimètres de sol. Les racines et le sol accolé à l'ensemble du système racinaire sont récoltés. Le sol global et le sol rhizosphérique sont prélevés. Un échantillon moyen composite de sol global et un autre de sol rhizosphérique est constitué en mélangeant les prélèvements de sols globaux et ceux de sols rhizosphériques pour chaque oliveraie.

Tableau 11 : quelques données de base sur les oliveraies étudiées.

Sites (abr)	Coord. Alt. (m)	Matériel parental	Pente	Type de sol ((WRI 2006)	Texture	pHeau	Calcaire total%	A%	Cg.kg ⁻¹	CEC cmolc.kg ⁻¹	KNH ₄ ⁺ mg/100g	KHNO ₃ mg/100g
Tizi-Rached1 (Tiz1)	36°41' 15. 71"N 4°12' 39. 27" E 216	grés	15%	Cambisol (eutric)	SAL	6,98	4,65	20,9	15,9	8,8	13,62	84,18
Mâatkas (Mat)	36°39' 49. 41' N 4°03'14. 53"E 496	schistes	20%	Cambisol (eutric)	LSA	6,72	2,12	16	17,2	6,82	15,66	52
Mechtras plaine (Mep)	36°32' 34. 51"N 4°00' 49' 98"E 404	glacis d'accumulation	0%	Cambisol (eutric)	SAL	7,1	3,41	28,7	15,6	17,01	24,6	61,24
Yakouren I (YakI)	36°46'32. 09"N 4°26'42. 07"E 327	Grés numidiens intercalés d'argiles	30%	Cambisol (eutric)	LSA	6,19	2,25	17,8	13,1	15,63	11,17	32,74
Yakouren II (YakII)	36°50'19. 22" N 4°29' 59. 17"E 163	Grés numidiens	25%	Cambisol (eutric)	LSA	6,32	2,5	15,1	11	13,5	14,02	59,34
Nezla (Nez)	36°47'04.42''N 4°13'40.00''E 492	alluvions anciennes	5%	Cambisol (eutric)	LS	7	2,3	16,53	4	12,24	26,13	80,08
Assi-Youcef I (AssI)	36°29' 37. 58"N 4°00' 41. 14"E 814	glacis d'accumulation	10%	Cambisol (eutric, chromic)	AS	7,53	3	33	20,1	13,71	9,41	38,73
Ouadhia (Oud)	36°42' 30. 51"N 4°04' 17. 77"E 100	Schistes	5%	Cambisol (eutric, chromic)	AS	6,71	1,75	28,1	9,8	17,18	11,27	44,43
Mechtras colline (Mec)	36°33'2' 54. 41"N 4°00' 47. 25" E 459	schistes micacés	25%	Cambisol (eutric, chromic)	SAL	7,07	0,87	22,2	18,4	13,12	7,66	69,74
Agouni-gueghrane (Ago)	36°30' 50. 03"N 4°07' 06. 14"E 625	Schistes et micro-schistes	30%	Cambisol (eutric, chromic)	AS	6,85	4, 50	38,75	16,2	25,5	16,62	89,04
Assi Youcef II (AssII)	36°29' 51. 57"N 4°00' 17. 50"E 790	Colluvions calcaires	0%	Cambisol (calcaric)	LSA	7,27	5,5	22,1	22,6	14,22	4,63	45,39
Oued-Aissi (Oua)	36°42'30. 51"N 4°04' 17. 77"E 100	calcaires	30%	Cambisol (calcaric)	LSA	7,49	33,66	9,26	5,5	7,51	20,78	25,28
Bouira (Bou)	36°23'43.19 'N 4°53'14.04''E 373	Alluvions anciennes	0%	Cambisol (calcaric)	LS	7,41	16,25	23,4	7,1	13,35	21,73	97,04
Guendoul (Guen)	36°44'20.63''N 4°13'05.91''E 546	calcaires	10%	Cambisol (calcaric)	Lpurs	7,62	13,13	13,68	12,9	13,46	26,7	59,08
Boukhalfa (Bouk)	36°44'48. 3"N 4°01'09. 11"E 81	Marnes	5%	Vertisol	AL	7,89	5	42,9	15,1	20,3	25,48	71,47
Yakouren III (YakIII)	36°47'16. 67"N 4°27' 36. 88"E 161	Argiles	0%	Vertisol	A	6,41	2,71	51,1	11	20,1	23,5	55,24
Tizi-Rached2 (Tiz2)	36°41'20.87"N 4°07'43.43"E 240	Calcaires	5%	Calcisol	LAS	7,65	11,1	21,90	13,9	14,4	23,65	66,98

1.3. Végétal

Dans chaque oliveraie, sur les 10 arbres, on procède au prélèvement des feuilles d'oliviers à la même période d'échantillonnage que les sols, durant la période de repos végétatif, afin d'échapper aux fluctuations rapides de la composition minérale des feuilles en période de croissance. 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.

1.4. Analyse des sols et du végétal

La fraction fine des sols a été soumise à une caractérisation physico-chimique et minéralogique comportant la granulométrie, le pH, le calcaire total, le carbone organique du sol, la capacité d'échange cationique. Les formes biodisponibles du potassium ; le potassium soluble, le potassium assimilable extrait à l'acétate d'ammonium, le potassium extrait à l'acide nitrique sont également mesurés. L'extraction des argiles a été réalisée selon la méthode physique. Les échantillons d'argiles sont saturés au SrCl_2 et KCl et soumis à une analyse par diffraction des Rayons X. Les diffractogrammes sont décomposés à l'aide du logiciel Decomp (Lanson, 1997).

Le potassium, le calcium, le magnésium sont dosés sur la poudre végétale au «laboratoire d'Analyses du CNRS», Solaize, France. Les feuilles récoltées sont lavées à l'eau distillée, séchées à l'étuve à 70°C pendant 48h, puis broyées pour obtenir de la poudre végétale. 1g de poudre végétale est minéralisé dans une solution acide. La solution est alors analysée en utilisant L'ICP-AES. Les teneurs en potassium, calcium et magnésium sont exprimées en g par 100g de matière sèche.

1.5. Analyses statistiques

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. Les coefficients de Pearson sont calculés par le logiciel Statistica pour déterminer des relations entre les caractéristiques chimiques et potassiques des sols globaux et rhizosphériques, de même qu'entre ces dernières et le potassium foliaire.

2. Résultats et discussion

2.1. Caractéristiques générales des vergers

2.1.1. Les sols

Les principales propriétés physiques et chimiques des sols étudiés sont présentées dans le tableau 11. Les sols prédominants sont des cambisols, calcisols et des vertisols.

Les sols diffèrent significativement par leur taux d'argiles (15,1 à 51,9% d'argiles) et leur teneur en CaCO_3 qui s'explique par la nature du matériel parental avec 0,87% de CaCO_3 pour l'oliveraie de Mechtras colline sur schistes, 33,66% pour l'oliveraie de Oued Aissi sur calcaires, ce qui permet d'obtenir une gamme de sol qui regroupe des sols très faiblement calcaires à fortement calcaires. Les plantes qui se développent dans ce type de sols carbonatés sont continuellement exposées à des déficiences en éléments nutritifs tels que le phosphore et le fer (Ramirez Rodriguez et al., 2005). Le CaCO_3 peut réduire la vigueur et le développement de l'olivier à travers son effet sur la biodisponibilité du P, Zn, Cu Mn, Fe et B (Galvez et al., 2004). Toutefois, Chaves (1975) précise que de très bon rendement et développement végétatif peuvent être observés à des taux de calcaire faibles ou atteignant 50% mais avec une limite de 76%.

Les pH sont neutres à modérément alcalins. L'olivier tolère une large gamme de pH mais c'est sur des sols avec des pH compris entre 7 et 8,5 que l'on obtient son meilleur développement (Loussert et Brousse, 1978).

Les sols diffèrent aussi par les teneurs en carbone organique (4 – 22,6‰) soit 6,8 à 37,8‰ de matière organique et par la CEC (6,82 - 26.50 cmol.kg^{-1}). L'olivier présente un bon développement sur des sols contenant des taux de matière organique supérieurs à 10‰ (Soyergin et al., 2002), toutefois Freeman et Carlson (1994) considèrent qu'un niveau de 15‰ de matière organique reste insuffisant. Seules les stations de Nez et Oua présentent des taux de matière organique inférieurs à 10‰ et celle de Bou inférieure à 15‰.

Les teneurs en potassium assimilable (KNH_4^+) des sols globaux comprises entre 4,62 et 26,7 mg/100g de terre varient largement. Gargouri et Mhiri (2002) ont établi pour des oliveraies cultivées en Tunisie des valeurs de potassium ramenées au taux d'argiles, considérées comme optimales : soit 80 ppm lorsque le taux d'argiles est inférieur à 15% et 150 ppm dans d'autres cas. Les sols des oliveraies de Yak1, AssI, Oud, Mec, AssI étaient déficients en potassium avec respectivement 11,17, 9,41, 11,27, 7,66 et 4,63 mg/100 g de terre.

En nous basant sur les résultats précédents, nous pouvons conclure à un statut initial différencié des sols pour les propriétés des sols tels que la texture, le calcaire total, le carbone organique, le pH, la CEC et le potassium assimilable. Les sols de 13 stations présentent un niveau adéquat en matière organique, ceux de 11 stations sont suffisamment pourvus en potassium assimilable.

2.1.2. Etat nutritionnel des oliveraies étudiées

Les teneurs en potassium foliaire comprises entre 0,6 et 1,4%, en magnésium foliaire comprises entre 0,16 et 0,37%, en calcium foliaire comprises entre 1,42 et 3,79% (Tableau 12) sont au dessus des seuils critiques de déficience indiqués par Morales-Sillero et al., (2009); Rodrigues et al., (2011) soit 0,8% pour le K foliaire, 1% pour le calcium foliaire et 0,1% pour le magnésium foliaire (Fernandez Escobar et al. 1999).

Les feuilles des oliviers sur sols déficients en potassium assimilable (Yak1, AssI, Oud, Mec, AssII), présentent les taux de potassium foliaire les plus bas soient respectivement 0,76, 0,92, 0,77, 0,64, 0,62% (Tableau 12). Par contre, l'oliveraie de Bouira se singularise par un sol suffisamment pourvu en potassium assimilable, mais elle présente la teneur en potassium foliaire la plus basse. L'acquisition par les plantes du potassium du sol dépend souvent de nombreux facteurs physiques et chimiques lesquels dans une large mesure le développement et la distribution spatiale des racines dans le sol et par conséquent l'aptitude à prélever les éléments nutritifs (Römheld et Kirkby, 2010). Des facteurs du sol inhibant le développement du système racinaire comme la déficience en bore, compaction des sols, la salinité, la sécheresse, limitent l'acquisition du potassium par les plantes en raison de leur effet sur la biodisponibilité spatiale du potassium (Römheld and Neumann, 2006). Römheld et Kirkby (2010) observent des symptômes visuels de déficience en potassium sur des cultures de légumes et de dicotylédones sous l'effet de la sécheresse, malgré la richesse des sols en potassium. Sous climat méditerranéen et pour des oliveraies conduites en culture pluviale, des teneurs de potassium basses ou déficientes dans les feuilles de vergers d'oliviers sont fréquemment mesurées ceci même pour ceux dont les sols sont suffisamment pourvus en potassium (Restrepo-Diaz et al. 2008a). La pluviométrie et l'évapotranspiration moyennes annuelles sont de 560 mm/an et de 998 mm /an pour Bouira. Les pluies ne satisfont pas à la demande de l'évapotranspiration, avec pour conséquence un important déficit hydrique pour la culture de l'olivier dans cette région qui expliquerait le paradoxe du sol de l'oliveraie de Bouira suffisamment pourvu en potassium assimilable mais dont la teneur en potassium foliaire était la plus basse.

Tableau 12 : variation des concentrations en potassium, calcium et magnésium foliaire en g/100g de matière sèche.

Stations	K Foliaire (%)	Ca Foliaire (%)	Mg Foliaire (%)
Tizi-Rached (Tiz)	1,32	2,41	0,24
Maatka (Mat)	1,08	2,25	0,28
Mechtras plaine (Mep)	1,09	1,90	0,18
Yakouren I (YekI)	0,76	1,92	0,22
Yakouren II (YekII)	1,03	1,42	0,21
Nezla (Nez)	0,80	1,92	0,16
Assi Youcef I (AssI)	0,92	3,35	0,22
Ouadhia bas (Oua)	0,77	2,00	0,27
Mechtras colline (Mec)	0,64	3,47	0,37
Agouni-gueghrane (Ago)	1,01	2,30	0,17
Assi Youcef II (AssII)	0,63	3,09	0,40
Oued aissi (Oua)	0,84	2,03	0,17
Bouira (Bou)	0,56	3,79	0,35
Guendoul (Guen)	0,96	1,98	0,20
Boukhalfa (Bouk)	1,11	2,30	0,31
Yakouren III (YakIII)	1,40	3,16	0,27

2.2. Effet rhizosphérique

Les résultats des caractéristiques physiques et chimiques des sols globaux et rhizosphériques sont présentés dans le tableau 13.

Un accroissement significatif de l'argile ($p \leq 0.05$), du carbone organique ($p \leq 0.01$) et de la CEC ($p \leq 0.05$) (Figure 26 a, b et c) est observé à proximité immédiate des racines. Divers auteurs, dans des conditions de climat et de sol diverses, et pour différentes espèces de plantes ont obtenu des résultats similaires : Gobran et al. (1998) ; Chen et al. (2002), Chiu et al., (2002), Turpault et al., (2005, 2007) et Dinesh et al., (2010) pour l'augmentation de la matière organique et de la CEC et Violante et al., (1998) ; Chen et al. (2002) ; Chiu et al., (2002) ; Watteau et al., (2006) pour celle de la fraction argileuse.

La compaction de la phase argileuse par les racines, au court de leur développement (Dommergues et Manganot 1980) et la sécrétion de mucigel par les argiles présentant un fort pouvoir d'absorption vis-à-vis des argiles et pourraient favoriser la concentration et la stabilité des phases argileuses le long des chenaux racinaires (Callot et al., 1982). Watteau et al., (2006) mettent en évidence la contribution de l'humification racinaire dans l'évolution d'associations organo-minérales stables dans la rhizosphère de maïs d'un sol limoneux.

Les changements les plus importants des propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols sont causés par la libération du carbone dans la rhizosphère (Jones et al., 2009). Turpault et al., (2007) ont lié cet enrichissement en carbone à la densité racinaire élevée et par conséquent à une importante exsudation de composés organiques. Il est désormais admis qu'en moyenne 20% du carbone assimilé (Hinsinger et al., 2005), 40% ou plus 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 détachées, de lysats et de CO₂ (Kuzyakov et Domanski 2000, Jones et al., 2009). Les rhizodépôts représentent une source d'énergie et d'éléments nutritifs qui stimulent la croissance des communautés microbiennes hétérotrophes (Valé et al., 2005 ; Gregory 2006 ; Nguyen 2009). L'exsudation de composés organiques dans la rhizosphère et l'activité biologique intense qu'elle génère peut avoir de multiples fonctions comme la diminution du pH ce qui entraîne l'amélioration de la biodisponibilité des nutriments, en particulier dans les sols calcaires (Hoffland et al., 1989 ; John et Darrah, 1994 ; Grayston et al., 1996 ; Hinsinger et al., 2009). De plus, la litière racinaire et la rhizodéposition sont une source importante pour la synthèse du carbone du sol (Balesdent et Balabane, 1996 ; Molina et al., 2001, Rees et al. 2005). L'apport de carbone par les racines de l'olivier a contribué à améliorer le stock d'humus dans des sols, sous climat méditerranéen, connus pour leur déficience en matière organique. L'augmentation de la CEC dans le sol rhizosphérique pourrait s'expliquer par l'augmentation de la fraction argileuse au voisinage de la racine. Les corrélations significatives et positives entre la fraction argileuse et la CEC des sols globaux ($r = 0,77$ $p \leq 0,001$), la fraction argileuse et la CEC des sols rhizosphériques ($r = 0,83$, $p \leq 0,001$), montraient que les argiles contribuaient significativement à la charge négative des deux fractions de sol.

Contrairement au carbone organique, le pH (Figure 26, d) des sols rhizosphériques diminue significativement ($p \leq 0,05$) dans la rhizosphère de toutes les oliveraies. Cette tendance générale à la diminution du pH dans la rhizosphère de plantes et dans différentes conditions a déjà été observée par divers auteurs (Ae et al., 1991; Ma et al., 2009 ; Dinesh et al., 2010). Les

racines des plantes et les microbes du sol de par leurs fonctions physiologiques sont capables de modifier considérablement le pH du sol rhizosphérique comparativement à celui du sol indemne d'activité racinaire (Hinsinger et al., 2009). Le pH baisse à proximité immédiate de la racine, en raison de l'émission de protons par la racine et leur diffusion lors de l'absorption plus importante de cations (John et Darrah, 1994).

Tableau 13 : quelques propriétés chimiques du sol global et du sol rhizosphérique des 16 oliveraies.

Station	Sol	Argile en (%)	Carbone organique (g.kg ⁻¹)	CEC (Cmol.kg ⁻¹)	pH
Tizi Rached1 (Tiz1)	G	20.9	15.9	8.8	7.0
	Rh	22.0	26.2	10.0	6.6
Maatka (Mat)	G	16.0	17.2	6.8	6.7
	Rh	17.0	20.0	9.7	6.4
Mechtras plain (Mep)	G	28.7	15.6	17.0	7.1
	Rh	30.5	19.7	22.0	6.8
Yakouren I (YakI)	G	17.8	13.1	9,7	6.2
	Rh	18.5	14.7	10,94	6.1
Yakouren II (YakII)	G	15.1	11.0	10,2	6.3
	Rh	15.6	20.6	11,3	5.8
Nezla (Nez)	G	16.5	4.0	10,2	7.0
	Rh	20.4	6.0	11,4	6.9
Assi Youcef I (AssI)	G	33.0	20.1	13.7	7.5
	Rh	33.7	33.6	16.8	6.6
Ouadhia bas (Oua)	G	28.1	9.8	17.2	6.7
	Rh	29.0	17.6	18.9	6.6
Mechtras colline (Mec)	G	22.2	18.4	13.1	7.1
	Rh	24.1	29.2	17.4	7.0
Agouni-gueghrane (Ago)	G	38.8	16.2	25.5	6.9
	Rh	40.7	24.3	30.8	6.6
Assi Youcef II (AssII)	G	22.1	22.6	14.2	7.3
	Rh	24.4	27.5	16.6	6.8
Oued aissi (Oua)	G	22,24	5.5	7.5	7.5
	Rh	24,62	10.2	10.4	7.5
Bouira (Bou)	G	23.4	13.3	10,03	7.4
	Rh	25.6	7.1	11,28	7.4
Guendoul (Guen)	G	13.7	12.9	9,36	7.6
	Rh	14.5	16.3	10,54	7.5
Boukhalfa (Bouk)	G	42.9	15.1	20.3	7.9
	Rh	44.0	15.6	26.0	7.3
Yakouren III (YakIII)	G	51.9	11.0	20.1	6.4
	Rh	53.3	12.7	25.1	6.3

L'augmentation de la concentration en acide carbonique due à la respiration des racines et des microorganismes (Hinsinger, 1998) et la libération d'anions organiques par certaines espèces végétales (Jaillard et al., 2000) contribuent à l'acidification de la rhizosphère. Les faibles diminutions de pH (0,05 à 0,64 unité de pH) que nous avons mesurées dans les sols rhizosphériques ne sont pas indicatrices d'un efflux limité de H^+ . Comme l'ont souligné Hinsinger et al., (2003), elles seraient plutôt dues au pouvoir tampon des nombreuses réactions qui se déroulent dans le sol, en particulier dans notre cas, celui des carbonates de calcium qui contrôlent les conditions acido-basiques. Les corrélations significatives obtenues entre le sol global et le sol rhizosphérique pour des propriétés du sol tels que le taux d'argiles le pH, le carbone du sol et la CEC (Figure 26. a, b, c et d), malgré des différences significatives, soulignent les relations existant entre le sol global et le sol rhizosphérique. Gobran et Clegg (1996), indiquent que de telles relations pourraient permettre d'extrapoler des données de sols d'une fraction de sol à une autre.

2.3. Distribution des formes biodisponibles du potassium

Les teneurs en potassium immédiatement disponible (K_s) fluctuent de 0,80 à 5,53mg/100g de terre dans les sols globaux et de 1,26 à 7,66 mg/100g de terre dans les sols rhizosphériques (Figure 27.a). Dans les sols globaux, les teneurs en KNH_4^+ fluctuent de 4,62 à 26,7 mg/100g de terre, tandis qu'elles varient de 7,87 à 30,35 mg/100g de terre dans les sols rhizosphériques (Figure 27.b). Les teneurs en potassium non échangeable varient de 4,5 à 75,31 mg/100g de terre pour les sols globaux et de 9,36 à 96,02 mg/100g de terre pour les sols rhizosphériques (Figure 27.c). Les teneurs en potassium extractible à l'acide nitrique varient de 25,28 à 97,04 mg/100g de terre en sols globaux, et de 30,14 à 123 mg de terre dans les sols rhizosphériques (Figure 27.d). Nous avons observé que sur différents types de sols à statut potassique initial différencié, la même variété d'oliviers, la Chemlal, a induit une augmentation des formes de potassium bio disponible au voisinage des racines. Des résultats similaires sont signalés par divers auteurs pour des études portant sur la rhizosphère d'arbres forestiers ou de plantes cultivées au champ. Celles-ci ont montré une plus forte concentration du potassium dans le sol rhizosphérique comparativement au sol global (Majdi et Bergholm 1995 ; Violante et al., 1998 ; Wang et Zabowsky 1998 ; Bagayoko et al., 2000 ; Chiu et al., 2002 ; Yanai et al., 2003 ; Turpault et al. 2005, 2007; Chen et al., 2006 ; Zhu et al.2006 ; Dinesh et al., 2010). Ces niveaux plus élevés en potassium biodisponible dans la rhizosphère seraient liés aux conditions physico-chimiques et minéralogiques du sol (Turpault et al., 2005) modifiées par l'activité de la racine et des microorganismes qui lui sont associés (Wang et Zabowsky, 1998).

L'absorption de potassium par l'olivier diminue sa concentration au voisinage de la racine. A l'opposé les microorganismes plus nombreux dans la rhizosphère intensifient la décomposition de la matière organique et avec la diminution du pH augmentent l'altération des minéraux (Hinsinger et al., 1993 ; Wang et Zabowsky, 1998 ; Norouzi et Khademi, 2010) mais aussi, le mass flow, l'exsudation de composés organiques (Smith, 1976 ; Claassen et Trehan, 1998) élèvent la concentration des éléments nutritifs donc du potassium, dans la rhizosphère.

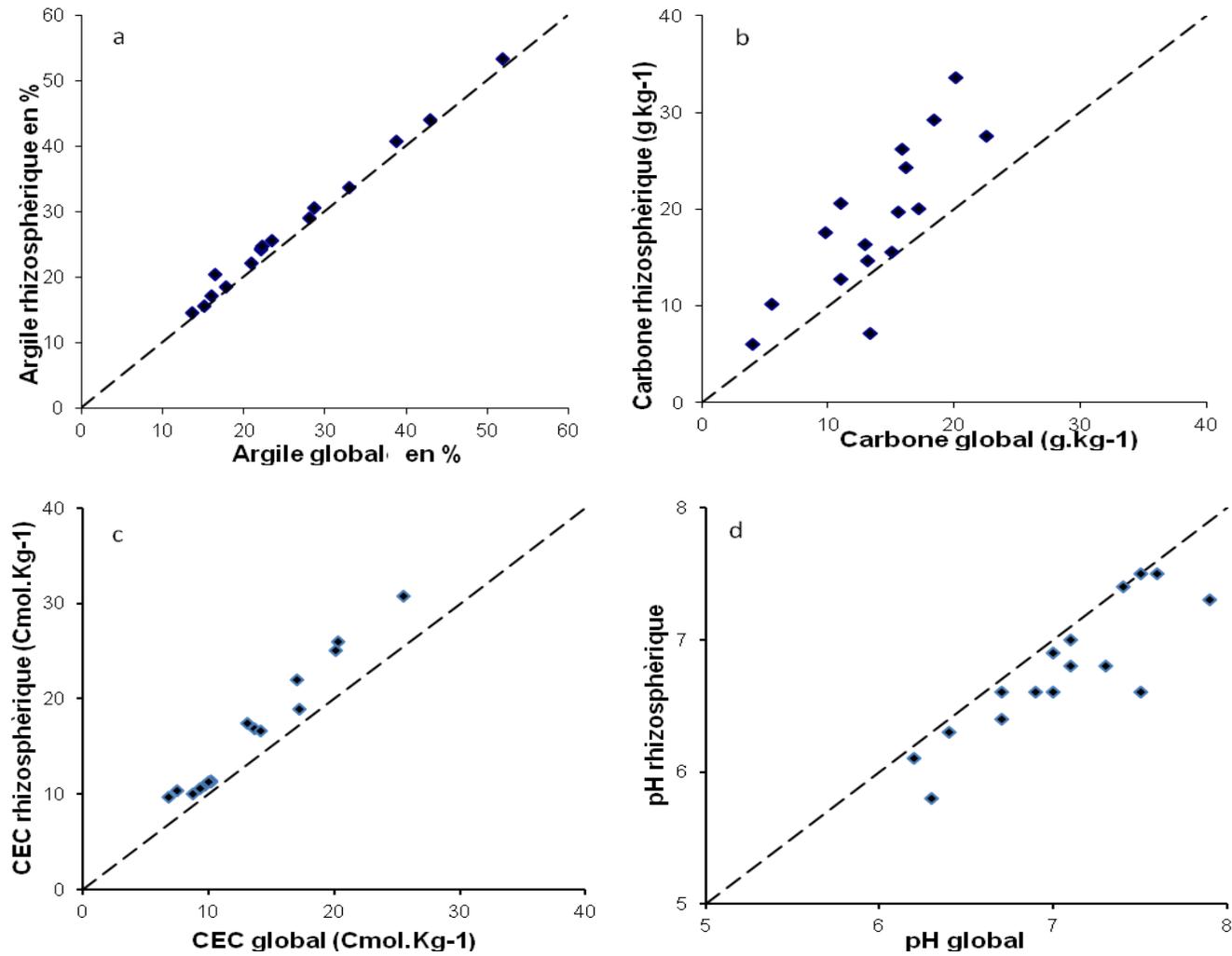


Figure 26 Accroissement significatif de la fraction argileuse (a), de la teneur en carbone du sol (b), en CEC (c) et du pH (d) dans le sol rhizosphérique des 16 stations étudiées.

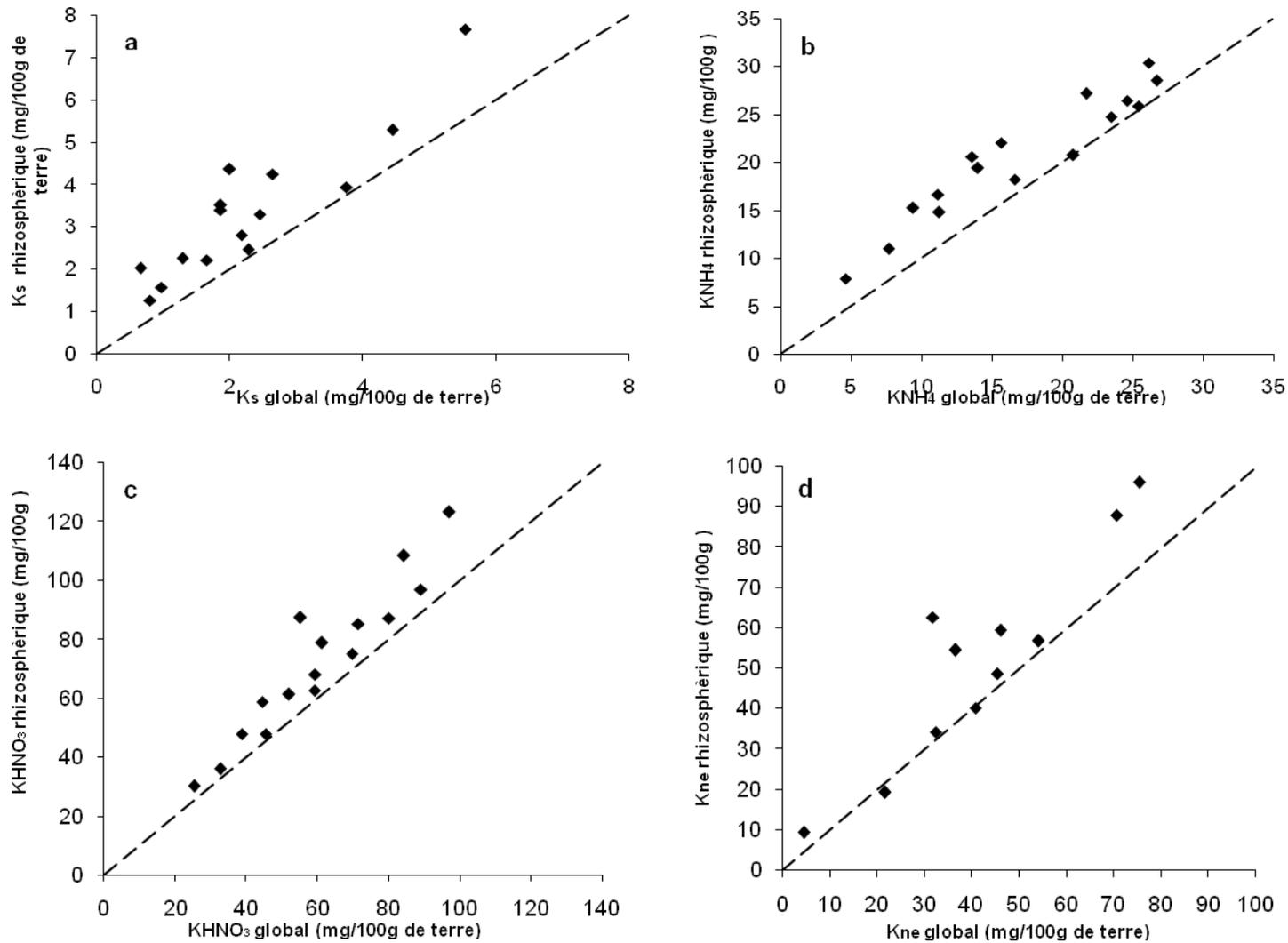


Figure 27 Accroissement significatif du potassium soluble (a), du potassium extractible à l'AcNH₄ (b), du potassium non échangeable (c) et du potassium extractible à l'acide nitrique (d). En moyenne le sol rhizosphérique s'enrichissait significativement ($p \leq 0.05$) en forme bio disponible du potassium et ceci pour l'ensemble des sols (figure 27 a, b, c et d).

Wang et Zabowsky (1998), Yanai et al., (2000), Turpault et al (2005) dans leur étude sur l'effet de la racine de *Pseudotsuga menziesii* et *Picea abies* et Zhu et al., (2006) dans son étude sur le thé ont conclu que l'accumulation du potassium dans la rhizosphère était causée par la prédominance de la libération du potassium dans la rhizosphère sur le prélèvement racinaire du potassium. Le prélèvement du potassium par la racine de l'olivier serait moins important, l'ensemble des oliveraies étudiées ne présentant pas de carences avérées en potassium. Dans le cas présent, il semblerait que les processus de la rhizosphère qui induisent une libération du potassium couplés à un prélèvement du potassium par la racine de l'olivier réduit en période de repos végétatif ont conduit à un enrichissement de la solution du sol rhizosphérique comparativement à celle du sol global. Vetterlein et Reinhold (2004) précisent que cette accumulation du potassium ne serait pas seulement due à un prélèvement moins important du potassium par la plante mais aussi à une conséquence de la diminution de la quantité d'eau à proximité des racines.

Dès que la concentration en potassium augmente dans la solution du sol rhizosphérique, le potassium est immédiatement adsorbé par les sites planaires (augmentation du K-NH_4^+) mais aussi fixé par les sites de serrages (augmentation de K_{ne}). Ces processus sont d'autant plus importants que le taux des argiles augmente au voisinage de la racine.

Violante et al., (1998) ont trouvé des résultats similaires pour une culture de maïs en plein champ. Pour ce qui est du potassium assimilable, on aurait du constater une diminution du pool échangeable du potassium mais aussi de la CEC après fixation du potassium, ce qui n'était pas le cas. Turpault et al. (2008), ont observé une fixation, mais aussi une CEC et un taux de saturation en potassium plus élevés dans la rhizosphère.

Dans les sols agricoles et forestiers, les ressources des sols sont inégalement réparties dans l'espace (Robinson 1996 ; Eissenstat et Volder, 2005 ; Ma et al. 2007). Cette hétérogénéité serait d'autant plus forte que les sols des vergers étudiés sont peu remaniés. Clegg et Gobran (1997) ; Schottelndreier et Falkengren-Grerup (1999), montrent que l'aptitude des plantes (*Picea abies* et graminées) à explorer des zones enrichies du sol expliquerait la plupart des différences entre sol global et rhizosphérique.

En terme de coût, l'exsudation de carbone par la racine au cours de sa vie peut être élevée, une des clés de l'efficacité des racines est de réaffecter les photoassimilés pour accentuer la prolifération racinaire dans les zones enrichies et ainsi maximiser le prélèvement

des nutriments (Eissenstat et Volder, 2005). Hinsinger et al., (2005) signalent qu'il est difficile de distinguer l'effet du à l'activité de la racine de celui du à l'hétérogénéité du sol en particulier dans les sols peu remaniés. Ce qui n'expliquerait qu'en partie l'enrichissement en potassium biodisponible mais aussi en carbone, en azote et en CEC des sols rhizosphériques. En effet, Turpault et al., (2005) soulignent qu'il est peu probable que l'ensemble du système racinaire colonise des zones de sols plus riches. La concentration en potassium bio disponible à proximité immédiate de la racine de l'olivier pourrait être la résultante de ces différents processus, ce qui indiquerait que les racines de l'olivier peuvent influencer sur la biodisponibilité du potassium.

Malgré des différences significatives, des corrélations hautement significatives ($p \leq 0.001$) entre les formes biodisponibles du potassium du sol global et celles du sol rhizosphérique sont déterminées (Figure 27.a, b, c et d). Ces relations étroites entre le potassium des deux sols, pourraient permettre d'extrapoler des données du sol global au sol rhizosphérique.

Les sols rhizosphériques de la majorité des stations étaient suffisamment pourvus en potassium assimilable (Figure 28) excepté les sols des oliveraies de Mec, AssII.

Cet enrichissement en potassium assimilable de la rhizosphère a permis pour certaines stations comme Yak1, AssI, Oud de ramener le niveau du potassium biodisponible prélevé par la racine à un niveau adéquat ce qui expliquerait les teneurs en potassium foliaire conséquentes malgré un sol global déficient en potassium assimilable. Il semblerait que pour le potassium, les teneurs suffisantes en potassium des feuilles pour certaines stations limiteraient le prélèvement racinaire et conduiraient plutôt à une augmentation du potassium à proximité de la racine.

La figure 29 a et b montre le potassium foliaire en relation avec le potassium assimilable et le potassium extractible à l'acide nitrique de la rhizosphère. Une tendance générale se dégage : une augmentation du potassium foliaire avec le potassium assimilable rhizosphérique. Toutefois, la station de Bouira (laquelle est la station la plus sèche à l'extrême sud du transect) semblerait se conduire différemment des 15 autres sites. Si Bouira est exclue des analyses, il y a une corrélation significative ($n=15$, $r^2=0,31$, $p=0,03$) entre le potassium foliaire et le potassium assimilable du sol rhizosphérique et une relation moins forte entre le potassium extractible à l'acide nitrique ($n=15$, $r^2=0,24$, $p=0,07$). Cette relation devient plus faible et non significative ($n=15$, $r^2=0,24$, $p=0,07$) lorsque l'on considère le potassium assimilable du sol global, elle n'existe plus lorsqu'il s'agit du potassium extractible à l'acide

nitrique du sol global ($n=15$, $r^2=0.03$, $p=0.55$). Nous n'avons pas établi de relations entre le potassium soluble et le potassium foliaire ($r^2<0.1$, pour tous les sols).

Il est intéressant de noter que les processus de la rhizosphère ont pu, dans une certaine mesure et pour certain sol déficient en potassium biodisponible, ramener les sols rhizosphériques à un niveau adéquat en potassium assimilable pour la culture de l'olivier.

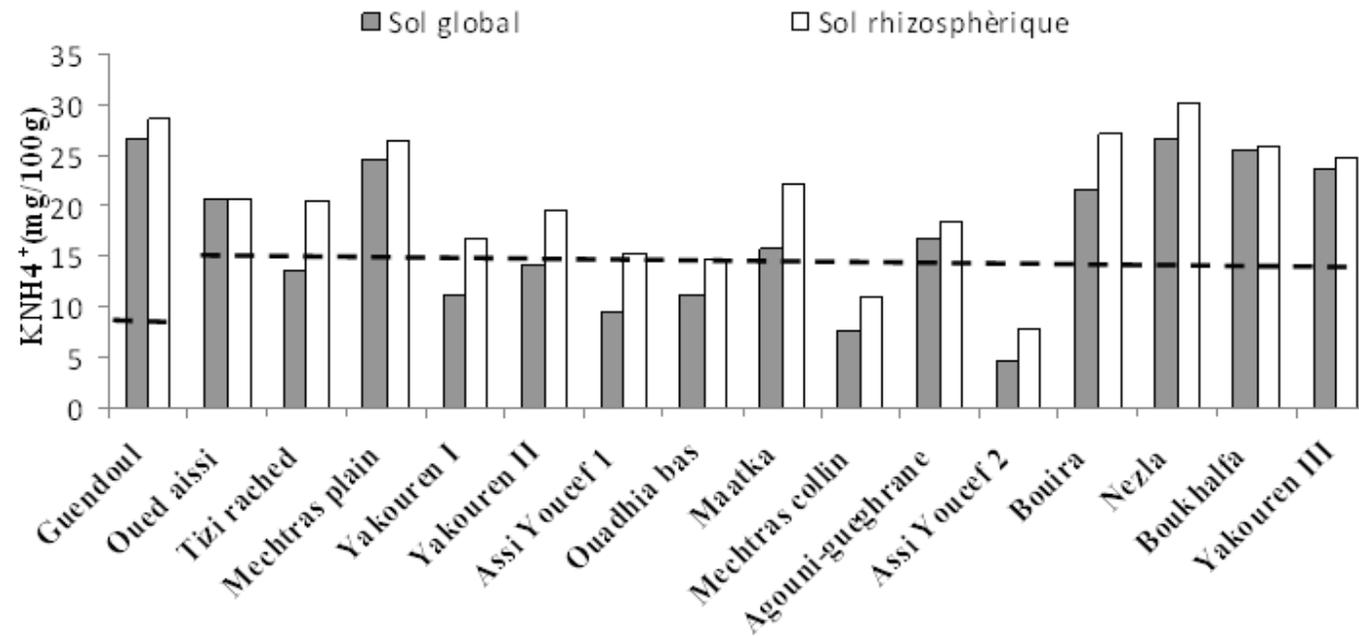


Figure 28 Potassium assimilable dans le sol global et la rhizosphere. La ligne en pointillé correspond au seuil de potassium en dessous duquel le sol est déficient en potassium (8 mg/100g pour des sols avec moins de 15% d'argiles, 15 mg/100g pour des sols avec plus de 15% d'argiles).

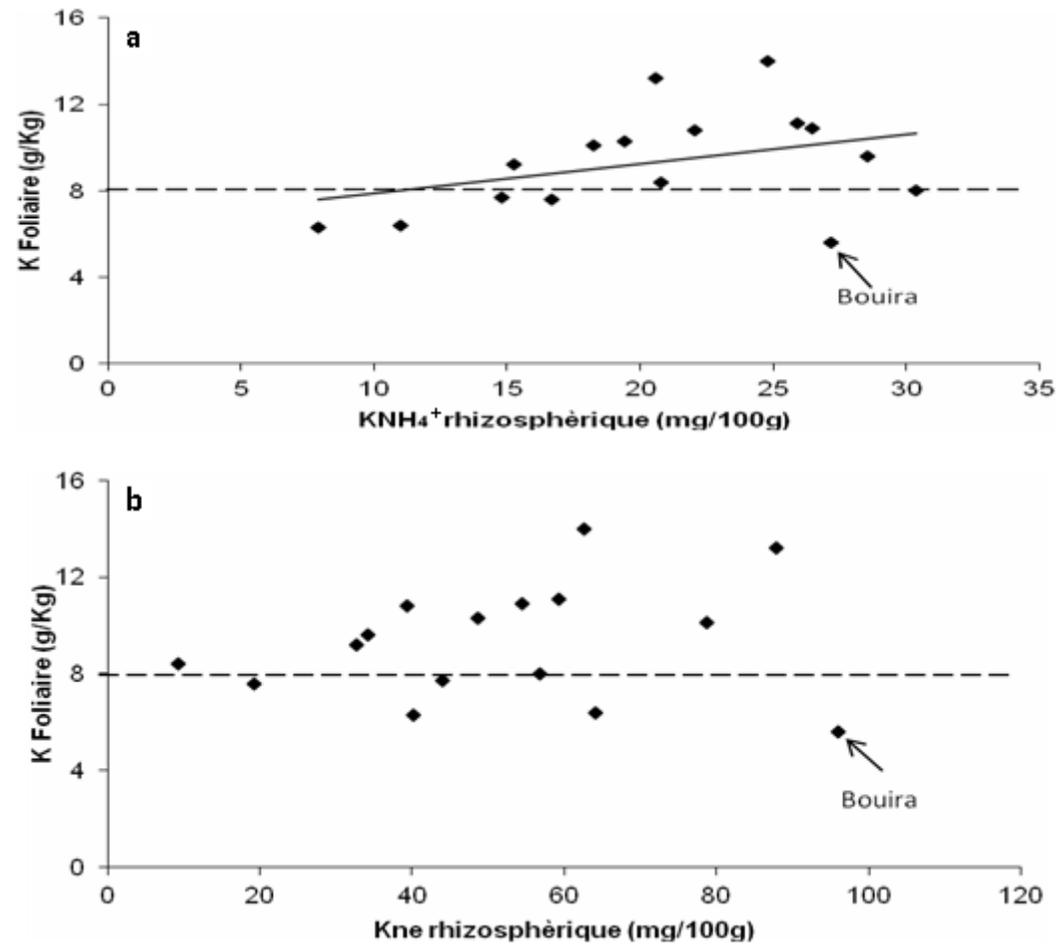


Figure 29 Relation entre le potassium foliaire et le potassium assimilable (a) et le potassium extractible à l'acide nitrique (b). Les données de la station de Bouira ont été exclues de la relation (trait plein). La droite en pointillé correspond au seuil limite de déficience en potassium foliaire pour l'olivier.

2.4. Fixation du potassium dans la rhizosphère révélée par la diffraction des Rayons X

Les diffractogrammes des argiles saturées au strontium des sols globaux et rhizosphérique sous olivier montrent la présence d'un pic de quartz (0,427 nm et 0,333 nm non montré) et de kaolinite (0,722 nm, non montré). Pour ce qui est des argiles intervenant dans la dynamique du potassium, nous observons la présence d'illite avec un pic autour de 1.0 nm, le pic à 1,44 nm peut correspondre à différents minéraux silicatés, cela peut être de la chlorite, de la vermiculite ou la deuxième réflexion d'un interstratifié Chlorite/Vermiculite. La saturation au potassium indique que ce serait de la vermiculite (Figure 30). Les pics à 1,44 nm, 1,0 nm, 0,722 nm et 0,427 nm sont dominants. Les diffractogrammes des argiles saturées au strontium des deux fractions de sols des quatre vergers d'oliviers présentent la même évolution (Figure 30).

Les abscisses des centres de gravité, les aires relatives de PCI et d'illite, qui augmentent dans la rhizosphère de l'olivier (Tableau.14) indiquent une augmentation du nombre de feuillets illitiques dans l'environnement proche de la racine de l'olivier comparativement au sol global. L'abscisse du centre de gravité est liée à la quantité de feuillets d'illite contenue dans la fraction argileuse, elle serait aussi une bonne approximation de la concentration en potassium total des argiles (Moore et Reynolds 1997). Les argiles du sol et en particulier les feuillets d'illite et d'illite/smectite se comporteraient comme un réservoir qui libèrerait (prélèvement par les plantes) ou fixerait (apport de potassium) du potassium (Barré et al., 2008).

Après saturation au potassium des argiles du sol global et rhizosphérique, le déplacement des centres de gravité vers le domaine de l'illite, montre que les argiles des deux fractions de sol sous oliviers avaient fixé du potassium. Il semblerait que les argiles du sol global présentaient une meilleure capacité à mettre en réserve le potassium sous forme non échangeable dans les feuillets d'illite. En effet le gain en centre de gravité (Tableau 14) après saturation au potassium était significativement ($p \leq 0,03$) plus important pour les argiles des sols globaux comparativement à celui des argiles des sols rhizosphériques (Tableau 14).

Cette augmentation plus faible du nombre de feuillets d'illites dans la rhizosphère sous l'effet d'un apport de potassium suggérerait que les argiles à proximité des racines étaient déjà enrichies naturellement en feuillets d'illite. La fixation du potassium par la fraction argileuse du sol rhizosphérique révélée par la diffraction des Rayons X a déjà été observée pour des sols forestiers (épinette rouge et bouleau jaune) dans les Smoky Mountains (USA) par April et

Keller (1990) et pour le douglas par Turpault et al. (2008) dans les montagnes du Beaujolais (France). Pour April et Keller (1990), cette fixation du potassium par les argiles se traduit par une intensification du pic de l'illite dans la rhizosphère. De la même façon, Vincenzo et al., 2003 observent que les argiles de la rhizosphère du maïs fixent du potassium et présentent une intensification du pic de l'illite. Pour les sols cultivés (maïs), Violante et al., (1998) expliquent cette fixation du potassium plus élevée dans la rhizosphère, par une plus forte sélectivité de cette dernière vis-à-vis du potassium comparativement au sol global.

Zeng et Brown (2000) ont montré que la rhizosphère avait fixé plus de potassium que le sol global sous l'effet de l'alternance humectation-dessiccation comparativement à celle de la culture dont le sol avait été maintenu à humidité constante. Ce qui expliquerait l'augmentation du potassium non échangeable des sols rhizosphériques mesurée par l'extraction à l'acide nitrique, mais aussi révélée par l'analyse par diffraction des Rayons X de la fraction $\leq 2\mu$ dans la rhizosphère. Par la mise en réserve du potassium plus importante par les argiles de la rhizosphère, la racine de l'olivier pourrait modifier la minéralogie du sol à sa proximité immédiate. Cette fixation protège le potassium de la lixiviation, mais elle pourrait aussi devenir réversible lorsque les conditions environnementales changent.

Tableau 14: aire relative du pic de l'illite et de PCI, abscisse du centre de gravité et modification de l'abscisse du centre de gravité après saturation au potassium.

Station	Sol	Aire relative du pic PCI en %	Aire relative du pic I en %	Abscisse du Cg Sr (nm)	Abscisse du Cg Sr ($^{\circ}2\theta$)	Abscisse du Cg K (nm)	Abscisse du Cg K ($^{\circ}2\theta$)	ΔCg (%)
		Saturation au Sr	Saturation au Sr					
Guendoul	G	6.9	8.3	1.26	7,01	1.13	7,77	9.8
	Rh	7.0	8.5	1.25	7,16	1.15	7,68	6.7
Nezla	G	3.6	5.6	1.30	6,81	1.16	7,65	11.0
	Rh	5.6	9.3	1.26	7	1.16	7,53	7
Tizi-Rached	G	9.0	13.3	1.38	6,4	1.19	7,4	13,5
	Rh	16.7	21.7	1.30	6,8	1.21	7,3	8,2
Bouira	G	15.2	20	1.21	7,3	1.15	7,68	4.9
	Rh	22	27,5	1.15	7,68	1.12	7,9	2,8

$$\Delta Cg \% = Cg K - Cg Sr * 100 / Cg K$$

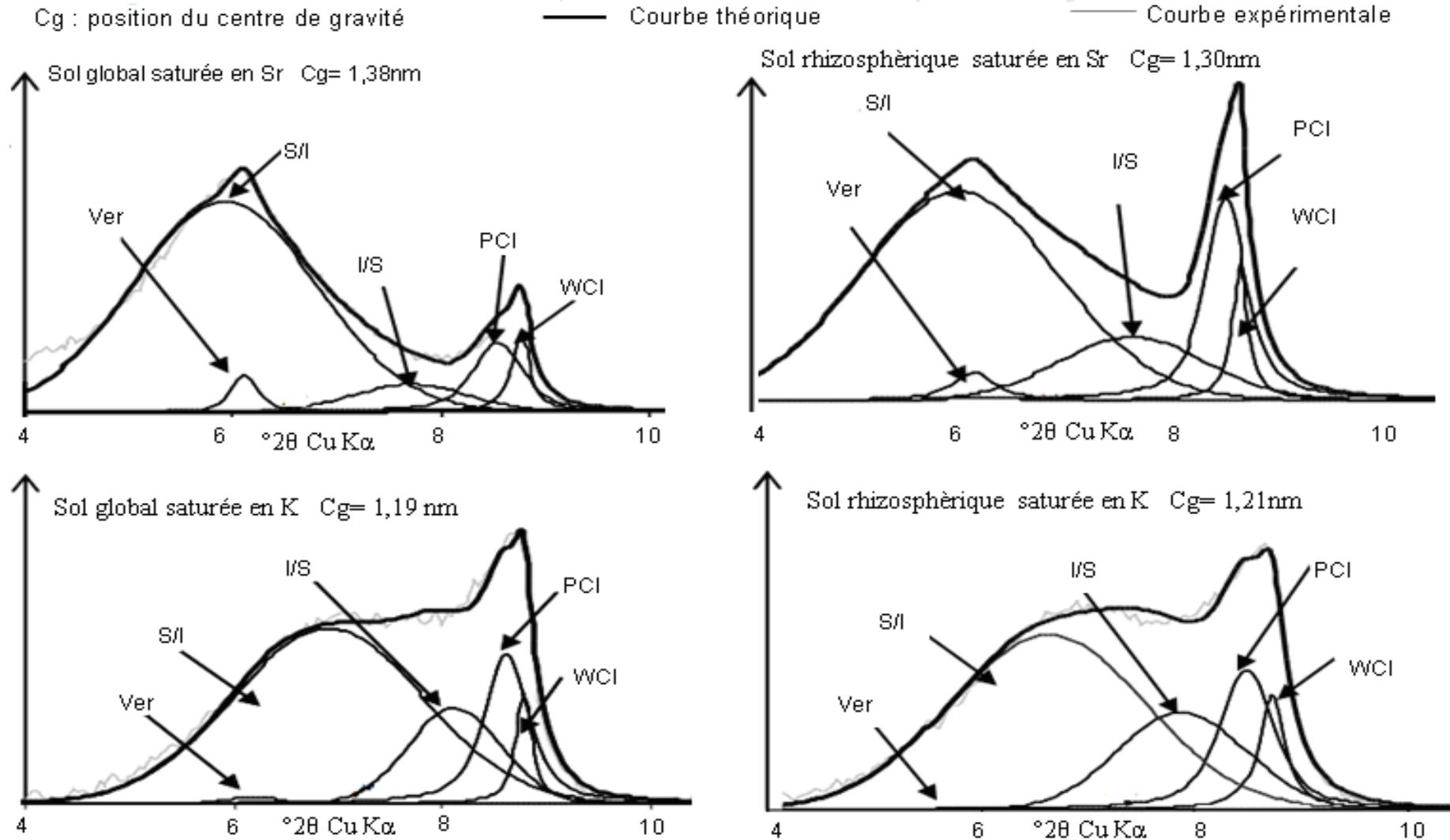


Figure 30 Diffractogrammes décomposés des argiles saturées au SrCl₂ et KCl de la station de Tizi Rached

2.5. Incidences sur les pratiques agricoles

Les sols étudiés auraient du être épuisés en potassium. En effet, pour chaque site, de grandes quantités de potassium ont été exportées par les olives par extraction du potassium des sols (Martinez et Sanchez, 1975), pendant des années sans aucune fertilisation potassium. Si certains des sols globaux sont déficients en potassium, les sols de 6 stations sur les 16 étudiés ne sont pas déficients en potassium. Si l'on considère les sols rhizosphériques, seuls les sols de deux stations sont déficients en potassium. La concentration en potassium dans les feuilles des oliviers de ces deux stations a révélé que les oliviers sont carencés en potassium. Les arbres de Ouadhia et Yakouren I sont également carencés en potassium mais la concentration en potassium foliaire reste proche de la valeur seuil de 0,8%. Même si la concentration en potassium rhizosphérique est au-dessus du seuil indiquant une déficience en potassium du sol pour ces deux sites, le potassium assimilable pour ces deux sites reste parmi les plus bas.

Le cas de Bouira est complètement différent. Le potassium foliaire a indiqué une carence sévère en potassium tandis que les analyses du potassium assimilable ont montré qu'il n'y avait apparemment pas de limite quand à l'approvisionnement en potassium du sol de cette oliveraie. Ce phénomène s'explique probablement par les contraintes climatiques. En effet, Bouira est de loin la station la plus sèche (les précipitations et l'évapotranspiration annuelles sont respectivement de 560 mm et 998 mm à Bouira alors qu'en moyenne dans le secteur étudié, elles sont de 826 mm et 1072 mm dans la partie nord du transect). Plusieurs auteurs ont indiqué que des conditions de sol très sèches pouvaient nuire à l'absorption du potassium par les plantes et conduire à une carence en potassium des cultures, même avec une disponibilité suffisante en potassium du sol (Restrepo-Diaz et al., 2008b; Römheld et Kirkby, 2010).

La présente étude suggère que les sols des oliveraies du Nord de la Kabylie sont moins déficients en potassium que prévu, mais la carence en potassium a néanmoins été observée dans plusieurs sites. Les résultats présentés sur la figure 29 montrent que la fertilisation potassique basée sur la mesure du potassium assimilable serait plus précise si l'analyse du potassium assimilable du sol étaient menée sur les sols rhizosphériques. En effet, même dans un sol global déficient en potassium, les oliviers peuvent édifier une rhizosphère suffisamment riche en potassium pour subvenir aux besoins des oliviers en K. Ceci a été observé à Tizi-Rached et Assi-Youcef et dans une moindre mesure à Yakouren I et Ouadhia.

Le diagnostic reposant sur le potassium rhizosphérique des sols peut aider l'optimisation de la fertilisation potassique qui est d'une grande importance dans certaines régions comme le Nord de la Kabylie où les engrais potassiques sont peu accessibles aux oléiculteurs en raison de leur coût prohibitif.

Les résultats obtenus à la station de Bouira permet d'envisager que d'éventuelles conditions extrêmes d'humidité du sol (et pas seulement le statut potassique du sol) interviennent lorsqu'il s'agit de l'absorption du potassium par les cultures dans les régions méditerranéennes.

De cette étude, nous pouvons conclure que, grâce à leur capacité à augmenter la concentration du potassium dans leur rhizosphère, les oliviers peuvent mieux faire face à des sols dont la disponibilité en potassium peut devenir un facteur limitant à plus ou moins long terme. Il serait intéressant de déterminer si d'autres arbres (tel que le figuier, très fréquent aussi dans le Nord de l'Algérie) ou plantes pouvaient également faire face à des sols déficients en K ou Si cela reste une caractéristique spécifique de l'olivier.

3. Conclusion

Quelque soit le type de sol ou son statut initial, les propriétés chimiques du sol sont modifiées significativement au voisinage de la racine de l'olivier. La rhizosphère de l'olivier apparait comme des sites de sols enrichis en matière organique du sol, en argile et en CEC propices à la croissance des racines et des microorganismes. L'enrichissement en matière organique de la rhizosphère et la diminution du pH permettrait à l'olivier de s'adapter à des sols souvent neutres à alcalins déficients en phosphore et en micronutriments.

La capacité d'échange cationique augmente à proximité de la racine de l'olivier, permettant ainsi une meilleure rétention des éléments nutritifs. Toutes les formes de potassium (KS , KNH_4 et $KHNO_3$) augmentent dans la rhizosphère de l'olivier et ce pour l'ensemble des sols quelque soit le statut potassique initial. Dans la plupart des cas, cette augmentation de potassium dans la rhizosphère fait que la déficience des sols en potassium basée sur l'analyse du sol global ne peut plus être considérée comme le seul critère dans le diagnostic de fertilité potassique de ces sols. Par ailleurs, une meilleure corrélation est trouvée entre le potassium foliaire et le potassium assimilable rhizosphérique plutôt qu'avec le potassium assimilable global.

Ces résultats suggèrent que les oliviers sont particulièrement adaptés à des sols pauvres en potassium et que l'évaluation des pools biodisponibles du potassium doivent être effectués sur des sols rhizosphériques et ceci afin d'optimiser l'utilisation des engrais potassiques dans les vergers d'oliviers. Un effet rhizosphérique subtil mais non moins présent est détecté sur les argiles des sols rhizosphériques se traduisant par une légère augmentation du nombre de feuillets d'illites de la fraction $\leq 2\mu$, indiquant une meilleure mise en réserve du potassium à proximité de la racine. La fixation accrue des ions K^+ par la fraction argileuse de la rhizosphère suggère également que le rôle de stockage du potassium par les argiles est important pour la conservation à long terme de cet élément dans la rhizosphère.

La racine de l'olivier utilise de l'énergie (photo assimilats) pour s'adapter à des milieux déficients en éléments nutritifs de façon à influencer sur son environnement et à créer un milieu plus favorable à sa croissance. Cette allocation des photoassimilats vers les racines pourrait prendre la forme d'exsudation de composés organiques et /ou d'un développement racinaire préférentiel dans les zones enrichies pour améliorer la biodisponibilité des nutriments. Par la création d'îlots de fertilité à l'échelle de la rhizosphère, l'olivier a amélioré la qualité et la fertilité du sol de l'agro écosystème olivier. Ce type d'étude dans des milieux pauvres en éléments nutritifs pourrait permettre une meilleure prise en compte de l'effet dynamique de la racine de l'olivier pour modifier à son avantage le sol à sa proximité immédiate et mieux contrôler la biodisponibilité des éléments nutritifs.

Cette étude nous a aussi donné l'opportunité de proposer une nouvelle orientation à la fertilisation des oliveraies en tentant de nous appuyer sur un management de la rhizosphère basé sur les processus rhizosphériques.

D-Diminution du potassium biodisponible à l'interface sol-racine de *Olea europea* L. avec l'application de doses croissantes d'engrais potassiques.

Introduction

Chez l'olivier, le potassium revêt une importance majeure, il intervient dans la nutrition de l'arbre, notamment, en période de pleine croissance végétative, pendant la floraison et au moment du grossissement des fruits. Enfin, et ce n'est pas le moindre de ces rôles, le potassium améliore le rendement en huile (Sopib, 2009). Par conséquent, les olives présentent des besoins élevés en potassium.

Dans le chapitre précédent, nous avons établis que les processus de la rhizosphère pouvaient pallier, dans une certaine mesure, à la déficience en potassium des sols globaux. Cependant cette stratégie tributaire d'un important déploiement racinaire horizontal va favoriser un individu mais à longue échéance induira un appauvrissement de l'ensemble de l'écosystème (Van Noordwijk et al., 1998). Toujours selon ces auteurs, la prospection par les racines de zones de sol plus profondes pour accéder aux réserves en éléments nutritifs et qui pourraient pallier à cet appauvrissement progressif des écosystèmes, est une opportunité qui reste souvent limitée pour la plupart des écosystèmes.

Dans des agro systèmes dont les sols à fortes contraintes (pente, faible profondeur, sécheresse des sols) sont souvent appauvris en éléments nutritifs comme c'est souvent le cas des oliveraies de Kabylie, la gestion de la rhizosphère dans l'objectif d'un développement durable du système plante-sol pourrait être l'une des approches pour optimiser l'utilisation efficace des ressources du sol. Parmi les actions qu'engloberait ce concept, la localisation des nutriments pour en augmenter la biodisponibilité avec pour corollaire une diminution des apports d'engrais (Zhang et al., 2010), pourrait se révéler une alternative efficace et intéressante à la quasi absence de fertilisation de ces oliveraies. Les surfaces réduites et la déclivité des parcelles, les coûts prohibitifs des engrais ne permettent pas aux oléiculteurs de pratiquer la fertilisation d'une agriculture conventionnelle.

La fertilisation peut avoir des effets profonds sur les propriétés chimiques de la rhizosphère, comme le pH et la biodisponibilité des éléments nutritifs. Ces changements peuvent affecter la croissance et la fonction d'absorption du système racinaire et donc la capacité des plantes à exploiter le sol pour en extraire l'eau et les nutriments Douglas et al. 2005). Robinson (2001) émet l'idée de maximiser l'absorption de P et N à partir de zones de

sols enrichies en N et P et ainsi, peut-être, compensé l'approvisionnement irrégulier de ces nutriments à partir de l'ensemble du système racinaire. De plus, Hodge et al., (2009) soulignent la rapidité avec laquelle les racines prolifèrent dans des zones enrichies en phosphore et en azote. Cette prolifération racinaire s'accompagne aussi d'une stimulation de l'absorption racinaire (Robinson, 2001).

De façon générale, les études sur l'effet de la localisation des engrais se sont principalement intéressées au développement et à l'architecture du système racinaire et au rendement d'espèces annuelles cultivées (Weligama et al., 2008 ; Jing et al., 2010 ; Zhang et al. 2010). L'effet de ce mode d'application des engrais et notamment des engrais potassiques sur la rhizosphère d'espèces pérennes comme les arbres, qui ont une influence plus marquée dans le temps sur les sols, reste à notre connaissance peu connu.

L'objectif de cette étude est de déterminer si l'application localisée d'engrais azoté et phosphaté, associée à celle de doses croissantes d'engrais potassiques pouvait affecter i) certaines propriétés chimiques et potassiques de la rhizosphère et ii) le statut nutritionnel d'une oliveraie du Nord de l'Algérie.

1. Matériel et méthodes

1.1. Description du dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est présenté au niveau de la figure 31

L'expérience sur le terrain a été menée pour caractériser les effets d'apports localisés de doses croissantes de potassium en combinaison avec un apport d'azote et de phosphore sur la biodisponibilité du potassium dans la rhizosphère et sur le statut nutritionnel des oliviers. La station d'étude est située à Tizi-Rached I. La densité de l'oliveraie est d'environ 100 arbres par hectare. Les oliviers sont âgés d'une cinquantaine d'années. Cette oliveraie est assez représentative de celles de la région de Kabylie.

Le dispositif expérimental choisi est celui du carré latin. Il est utilisé dans des conditions très hétérogènes. Dans notre cas, l'hétérogénéité sur le terrain est due à la pente mais aussi probablement au matériel végétal. En effet, malgré que les oliviers soient du même âge, il est souvent observé, pour cette espèce fruitière, une forte alternance dans la production. Au sein d'une même oliveraie, certains oliviers présentent une production plus élevée que d'autres, et l'inverse l'année suivante. La parcelle est située sur une pente de 20%, le sol est un cambisol sur grès. La texture est un limon argilo sableux. Le dispositif a été mis en place

en février 2005. Le seul facteur variable est le potassium, tous les autres facteurs de croissance étant aussi égaux que possible. Cette expérimentation a nécessité 4 traitements à raison de 4 répétitions.

Les traitements sont des apports d'engrais azotés, phosphatés et potassiques de type : sulfan à 24% (12% d'ammonium, 12% de nitrates et du soufre sous forme de sulfate), superphosphate à 46% et du sulfate de potassium à 50%. Comme nous n'avions pas de données concernant la production d'olives dans cette parcelle, afin de calculer les doses d'engrais à appliquer, nous nous sommes basés sur les besoins d'un olivier en pleine production (Walali et al 2003). Ces auteurs préconisent pour l'azote 0,6 à 1,5 kg d'azote par arbre, nous avons opté pour une moyenne de 1kg d'azote par arbre soit 4 kg d'ammonitrate à 24% par olivier, pour le phosphore, 0,8 à 1kg de P_2O_5 par arbre soit en moyenne 2kg de superphosphates à 46% par arbre, pour le potassium 1 à 1,5kg de K_2O par arbre soit 2 à 3kg de sulfate de potassium à 50%. Etant donné que nous faisons varier la dose de potassium, nous avons opté pour 3 doses soient 2 ; 4 et 6Kg de sulfate de potasse par arbre.

Les doses suivantes sont obtenues :

- le témoin : NPK₀. (4kg de sulfan par arbre ; P=2kg de superphosphate; K₀= 0kg de K par arbre)
- NPK₁ (4kg de sulfan par arbre ; P=2kg de superphosphate ; K₁ = 2kg K_2SO_4 /arbre)
- NPK₂ (4kg de sulfan par arbre ; P=2kg de superphosphate ; K₂=4 kg K_2SO_4 /arbre)
- NPK₃ (4kg de sulfan par arbre ; P=2kg de superphosphate ; K₃= 6kg K_2SO_4 /arbre).

Pour chaque traitement et chaque olivier, les doses d'engrais azotés, phosphatés et potassiques correspondantes sont mélangées manuellement. Le développement des racines est très sensible aux variations de l'offre et de la distribution des éléments nutritifs dans les sols (Ford et Lorenzo, 2001). Les racines prolifèrent dans les zones enrichies en phosphore et en azote (Hodge et al., 2009). Cette application localisée de l'azote mais surtout du phosphore devrait favoriser la prolifération racinaire de l'olivier. Quant au potassium, son effet sur la prolifération racinaire serait moins évident (Fernandez-Escobar et al., 2004). Nous avons donc localisé les apports d'engrais dans huit cavités de 40cm de profondeur et 50cm de diamètre (Figure 31). Les cavités sont ouvertes à l'aplomb de la circonférence du houppier de l'arbre, zone où le système racinaire de l'olivier est le mieux développé. Elles sont également réparties autour de l'arbre et à équidistance du tronc (2,5m) (Figure 31).

Chaque mélange correspondant à un traitement. Par exemple, pour la dose NPK₂ est divisé en huit fractions égales. Chaque fraction est mélangée au volume de terre retiré de chaque cavité qui à son tour est comblée par le mélange terre-engrais. Ce dispositif nous

permet de créer des zones enrichies en nutriments à proximité immédiate du système racinaire. Pour limiter une lexiviation trop importante de l'azote par les pluies automnales, la fumure a été appliquée au mois de mars 2005, malgré que le phosphore et le potassium dans un plan de fumure conventionnel devraient être apportés en automne (Jordao et al., 1993).

1.2. Echantillonnage des sols et du végétal

Afin d'obtenir des effets significatifs de la fertilisation sur les teneurs en N, P et K ainsi que sur les propriétés chimiques et potassique des sols à proximité des racines de l'olivier, l'échantillonnage a été réalisé à la période de la reprise végétative, à la fin du mois de février 2008 soit trois ans après la fertilisation. En effet, Jordao et al., (1993) signalent qu'ils n'ont obtenu d'effet significatif de la fertilisation sur la teneur en N, P et Mg qu'au bout de 3 années après la fertilisation. Les trois fractions de sol sont prélevées dans les huit trous pour chaque répétition des 4 traitements. En tout 48 échantillons de sols soit 16 échantillons de sol global, 16 échantillons de sol rhizosphérique et 16 échantillons de rhizoplan sont prélevés.

Le sol global correspond au sol prélevé dans le trou, qui n'est pas retenu par les racines, et qui est considéré indemne de toute activité racinaire. Le sol rhizosphérique correspond au sol des agrégats inférieurs à 1cm de diamètre, accolés aux racines fines de diamètre inférieur à 2mm. Le sol rhizosphérique est obtenu en secouant délicatement les racines. Le rhizoplan est recueilli par un léger brossage des racines fines de diamètre inférieur à 2mm. La même masse de sol global est pesée pour chacun des huit trous. Afin d'éviter des distorsions dans l'échantillonnage, nous avons procédé au mélange de ces huit masses de terre par arbre, ce qui permet d'obtenir un échantillon moyen composite représentatif du sol global de l'arbre. Un échantillon moyen composite représentatif du sol rhizosphérique et du rhizoplan est confectionné de façon similaire.

Les prélèvements des feuilles sur l'ensemble des arbres et l'échantillonnage du sol sont réalisés à la même période.

Afin de déterminer les caractéristiques chimiques et potassiques des différentes fractions de sol et le statut nutritionnel des oliviers de sol non fertilisé (sol naturel), l'échantillonnage du sol global, du sol rhizosphérique et du rhizoplan de 4 oliviers qui n'ont pas reçu d'engrais NPK est réalisé au sein de la même parcelle.

1.3. Analyse du sol et du végétal

La fraction fine des sols a été soumise à une caractérisation physico-chimique comportant la granulométrie, le pH, le carbone du sol et la capacité d'échange cationique. Les formes bio-disponibles du potassium : le potassium soluble, le potassium assimilable extrait à l'acétate d'ammonium, le potassium extrait à l'acide nitrique sont également mesurés. Les feuilles cueillies ont été lavées à l'eau distillée, séchées à l'étuve à 70°C pendant 48h. L'azote, le phosphore et le potassium sont dosés sur la poudre végétale.

1.4. Analyses statistiques

L'étude statistique est réalisée en randomisation totale, à raison de 4 traitements avec 4 répétitions (4 arbres) à l'aide du logiciel Statbox. Les coefficients de Pearson sont calculés par le logiciel Statistica version 6 pour déterminer les relations entre les propriétés chimiques des trois fractions sols, et avec le potassium foliaire.

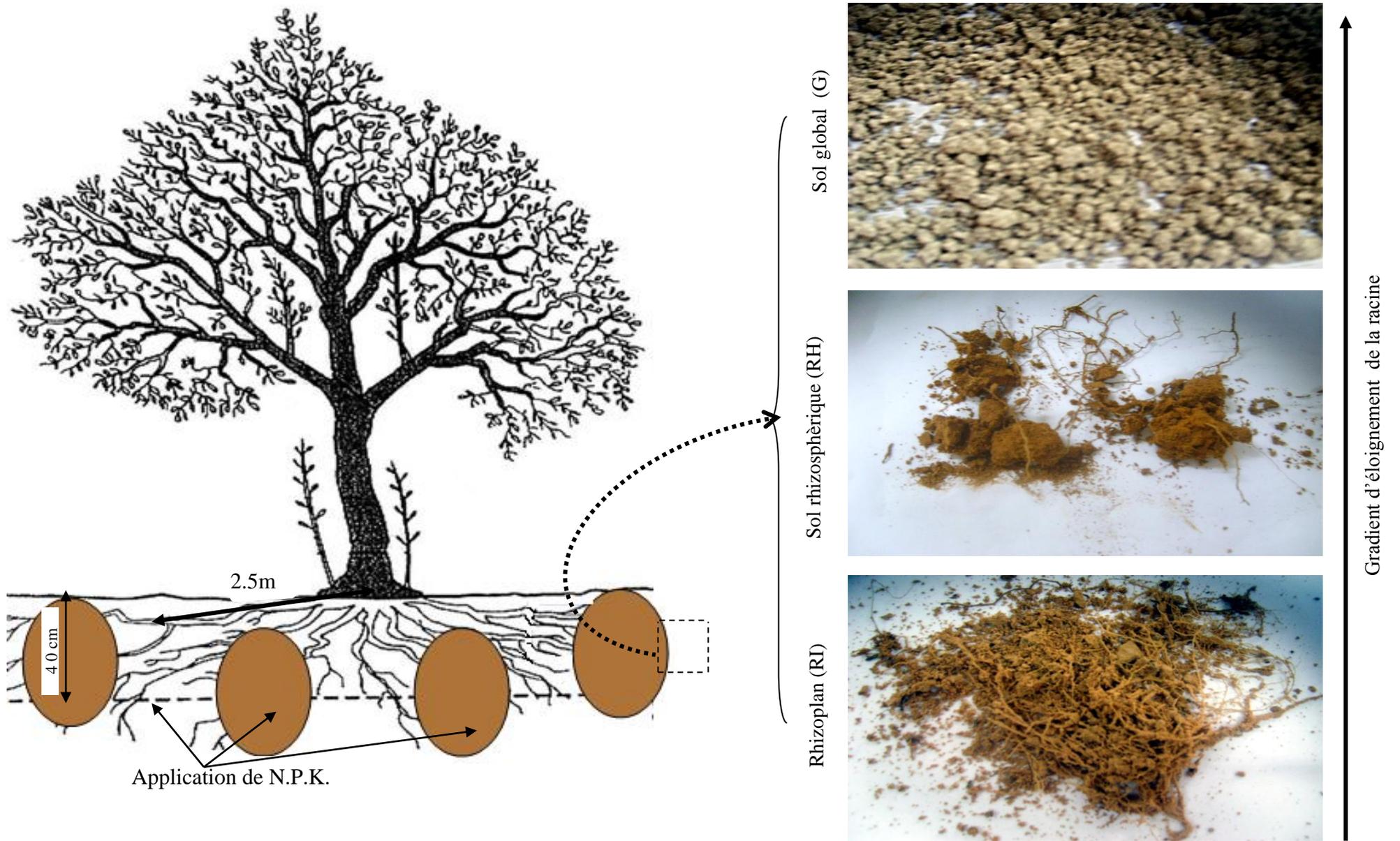


Figure 31 Schéma du dispositif expérimental et échantillonnage des trois fractions de sol

2. Résultats et discussion

2.1. Le sol naturel

Les résultats des caractéristiques physiques et chimiques du sol naturel sont présentés dans le tableau 15.

Le sol global de l'oliveraie étudiée est un limon argilo-sableux, à pH légèrement acide. L'olivier présente un bon développement sur des sols contenant des taux de matière organique supérieurs à 10‰ (Soyergin et al., 2002), malgré que Freeman et Carlson (1994) considèrent qu'un niveau de 15‰ reste insuffisant. Avec un taux d'environ 46‰ de matière organique, ce sol est suffisamment pourvu en matière organique pour la culture de l'olivier. Gargouri et Mhiri (2002) ont établi pour des oliveraies cultivées en Tunisie des valeurs de potassium ramenées au taux d'argiles, considérées comme optimales : de 8 mg.Kg⁻¹ lorsque le taux d'argiles est inférieur à 15% et 15 mg.Kg⁻¹ dans d'autres cas. Le sol de l'oliveraie étudiée qui présente une teneur en potassium assimilable de 8,22 mg.Kg⁻¹ et un taux d'argiles de 20%, n'est pas suffisamment pourvu en potassium pour un bon développement de la culture de l'olivier.

Le rhizoplan s'enrichit significativement (Tableau 15) en carbone organique et en KNH₄⁺ et en potassium échangeable. Une tendance semble se dégager. Un gradient d'augmentation du carbone, de la CEC, du KNH₄⁺ et du potassium échangeable du sol global vers le sol à proximité de la racine. Au contraire c'est un gradient de diminution du pH du sol global vers le rhizoplan qui est observé.

2.2. Statut nutritionnel des oliviers

Les résultats des teneurs en azote, phosphore, potassium et calcium des feuilles figurent dans le tableau 16.

Tableau 15 : principales caractéristiques physiques et chimiques du sol nature 1

Fraction de sol	Ph	A%	C%	CEC Cmol.kg ⁻¹	Ks mg /100g de terre	KNH ₄ ⁺ mg /100g de terre	Kne mg/100g de terre	KHNO ₃ mg/100g de terre	Kex mg/100g de terre	Kex/CEC
G	6,41 ±0,09	20,9	2,37 ±0,38	6,63 ±0,73	0,89 ±0,14	8,28 ±1,62	59,05 ±12,7	67,34 ±14,52	7,4 ±1,63	1,05 ±0,25
RH	6,44 ±0,073	22	2,45 ±0,33	7,1 ±0,85	0,82 ±0,82	7,02 ± 1,17	47,47 ±6,74	54,75 ±7,26	6,19 ±1,72	0,88 ±0,22
Rp	6,2 ±0,05		3,1 ±0,24	9,17 ±0,43	0,85 ±0,85	11,98 ±2,45	60,83 ±3,23	72,83 ±5,84	11,12 ±2,41	1,34 ±0,27
Effet racine	NS		THS	NS	NS	S	NS	NS	S	NS
Coefficient de variation %	1.28		1,51	9,82	16,88	22,61	15,90	15,94	24.9	24,37

Tableau. 16 : concentration en azote, en phosphore et en potassium foliaire en %.

Doses	N	P	K
NPK ₀	1,77 ±0,12	0,13 ±0,01	1,07 ±0,06
NPK ₁	1,77 ±0,22	0,14 ±0,01	1,28 ±0,24
NPK ₂	1,90 ±0,06	0,15 ±0,022	1,29 ±0,25
NPK ₃	1,82 ±0,17	0,14 ±0,01)	1,14 ±0,13
Effet dose	NS	NS	NS
Coefficient de variation %	8,51	12,14	15,53

Les teneurs en azote foliaire comprises entre 1,77 et 1,90% ; en phosphore foliaire entre 0,13 et 0,15% et en potassium foliaire entre 1,07 et 1,29% au dessus au dessus des seuils critiques de 1,5% d'azote foliaire, 0,1% de phosphore foliaire et 0,8% de potassium foliaire (Fernandez-Escobar, 1999, Morales-Sillero et al., 2009; Rodrigues et al., 2011) et ceci pour l'ensemble des doses d'application de potassium. Ce qui précède indique que les oliviers de cette parcelle se caractérisent par un statut nutritionnel adéquat pour les éléments N,P et K. Malgré que l'application de doses croissantes d'engrais potassiques n'a pas augmenté significativement le potassium foliaire des arbres fertilisés, une légère amélioration de la teneur en potassium des oliviers fertilisés avec les doses NPK₁, NPK₂ et NPK₃ est observée.

2.3. Effet de la fertilisation sur les propriétés chimiques et potassiques de la rhizosphère

La fertilisation a eu des effets substantiels sur les propriétés chimiques et potassiques des trois fractions de sol (Tableau 17).

2.3.1. Augmentation du carbone et de la CEC dans les rhizoplans

Les teneurs en carbone du sol et les valeurs de la CEC figurent dans le tableau 15 pour le sol naturel et dans le tableau 17 pour les sols fertilisés.

Pour le carbone du sol, les résultats obtenus montrent que les taux de carbone organique sont moyens à élevés. Les taux de matière organique sont significativement ($p \leq 0,001$) supérieurs au niveau du rhizoplan (Figure 32). La zone de sol autour des racines reçoit une plus grande entrée de carbone labile : c'est la rhizodéposition (Kuzyakov et al., 2006). En effet, en moyenne 20 % du carbone assimilé (Hinsinger et al. 2005), 40% ou plus 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 détachées, de lysats et de CO₂ (Kuzyakov et Domanski 2000, Jones et al. 2009). De plus, de nombreux résidus retrouvés dans la rhizosphère et colonisés par les micro-organismes, contribuent à augmenter le taux de carbone dans la rhizosphère (Darrah et al., 2006 ; Watteau et al., 2006). La diminution de carbone organique dans le sol rhizosphérique par rapport au sol global est plus difficile à expliquer et est en contradiction avec la littérature qui indique plutôt une accumulation de carbone organique dans la rhizosphère.

C'est sur les sols globaux que l'on observe le plus d'effet de l'application des engrais. Les teneurs en carbone des sols globaux diminuent avec les apports d'engrais et suivent la tendance suivante sol global NPK₁> sol global NPK₂> sol global NPK₃> sol global NPK₀. Par contre l'interaction sol/traitement très hautement significative présente un effet bénéfique à partir de la dose NPK₂ en élevant le taux de carbone du sol dans le rhizoplan. En effet, la teneur en carbone du rhizoplan suit la tendance suivante : Rp NPK₃>Rp NPK₂>Rp NPK₁>Rp NPK₀. L'effet de la racine associé à celui des doses croissantes en potassium a pour résultat une amélioration très hautement significative de la teneur en carbone dans le rhizoplan. Calvaruso et al., (2011) mesurent une augmentation du carbone du sol dans la rhizosphère de sols forestiers de peuplements fertilisés du douglas et de l'épinette de Norvège.

L'apport d'engrais azoté en absence de potassium induit la plus faible teneur en carbone dans le sol global, le sol rhizosphérique et le rhizoplan (Figure 32). La diminution du taux de matière organique des sols fertilisés avec les engrais azoté et phosphaté seuls pourrait s'expliquer par une intensification de la minéralisation en présence d'azote. En revanche, l'application d'engrais potassiques correspondant à 3 fois les besoins de l'olivier associé à l'effet de la racine induit la plus forte augmentation de carbone dans le sol à proximité immédiate des racines. Autant l'interaction engrais azoté-sol global et dans une moindre mesure sol global-engrais potassique a un effet dépressif sur la quantité de matière organique, autant l'association engrais potassique et rhizoplan présente un effet bénéfique qui se traduit par une augmentation significative du taux de matière organique à proximité de la racine.

Ces résultats sont en contradiction avec l'hypothèse selon laquelle les plantes investiraient davantage dans les racines et dans la rhizodéposition dans les milieux à faibles intrants. Swinnen et al., (1995) invalident cette hypothèse lorsqu'ils mesurent une rhizodéposition et une quantité de racines plus élevées dans la rhizosphère de sol d'agriculture conventionnelle. Dans notre cas, l'amélioration de la teneur en carbone organique du sol à proximité immédiate de la racine pourrait s'expliquer par une prolifération du système racinaire dans les zones enrichies. Jing et al., (2010) ont mesuré une plus grande quantité de racines fines dans des zones enrichies en engrais azoté et phosphaté. Cette prolifération de racines s'accompagnerait d'une plus grande quantité de sol sous l'influence de la racine, et donc d'un plus grand effet rhizosphérique.

Tableau 17 : principales propriétés chimiques et potassiques des 3 fractions de sols (sol global, sol rhizosphérique et rhizoplan) pour les différentes doses de potassium appliquées

Doses	Fraction de sol	pH	C%	CEC Cmol.kg ⁻¹	Ks mg /100g de terre	KNH ₄ mg/100g de terre	Kne mg/100g de terre	KHNO ₃ mg/100g de terre
NPK ₀	G	5,39 ±0,26	1,36 ±0,15	6,93 ±1,33	1,46 ±0,11	7,68 ±1,85	71,35 ±9,8	79,13 ±11,28
	RH	5,58 ±0,15	1,10 ±0,43	6,81 ±0,42	1,44 ±0,13	6,83 ±1,09	65,39 ±13,5	72,22 ±13,9
	RP	6,39 ±0,05	2,48 ±0,17	9,30 ±0,70	2,20 ±0,68	9,36 ±2,9	76,61 ±6,17	85,97 ±6,8
NPK ₁	G	5,72 ±0,17	1,78 ±0,27	6,07 ±1,36	9,70 ±0,24	23,44 ±5,84	92,08 ±18,1	115,52 ±23,8
	RH	5,92 ±0,06	1,63 ±0,24	5,54 ±0,42	3,21 ±0,32	14,66 ±2,16	70,34 ±6,61	85,00 ±9,22
	RP	6,50 ±0,10	2,79 ±0,25	8,25 ±0,79	3,38 ±0,13	13,79 ±0,79	80,84 ±18,15	94,64 ±3,1
NPK ₂	G	5,74 ±0,05	1,69 ±0,08	5,92 ±0,17	10,71 ±1,44	37,67 ±10,26	90,96 ±8,15	128,63 ±14,3
	RH	5,98 ±0,16	1,60 ±0,05	5,31 ±0,31	7,08 ±0,76	22,96 ±2,41	81,27 ±6,61	104,23 ±13,1
	RP	6,13 ±0,01	3,40 ±0,03	7,30 ±0,48	7,46 ±2,73	19,70 ±10,04	85,43 ±18,15	105,12 ±20,15
NPK ₃	G	5,63 ±0,04	1,42 ±0,42	5,64 ±0,49	17,84 ±4,80	48,67 ±11,07	114,64 ±15,1	163,31 ±30,44
	RH	5,77 ±0,04	1,46 ±0,18	5,29 ±0,71	9,60 ±3,40	30,87 ±5,63	81,24 ±15,1	112,11 ±18,12
	RP	6,21 ±0,014	3,83 ±0,17	7,60 ±0,42	11,15 ±1,03	24,53 ±5,75	85,55 ±11,4	110,08 ±15,9
Effet dose		THS	THS	THS	THS	THS	THS	THS
Effet racine		THS	THS	THS	THS	THS	THS	THS
Interaction Sol-Dose		THS	THS	NS	THS	THS	NS	HS
CV(%)		1,71	10,08	9,22	24,86	24	12,44	13,78

Calvaruso et al., (2011) ont montré qu'une relation linéaire liait la quantité de sol rhizosphérique à la densité des racines fines. L'effet rhizosphérique qui consiste principalement en la rhizodéposition serait donc plus important dans les rhizoplans des sols enrichis en engrais NPK en raison de la prolifération racinaire. Cette dernière induit aussi une contribution plus importante de la litière racinaire à l'augmentation du pool de la matière organique.

La capacité d'échange cationique varie de 5,64 à 6,93 cmol. Kg⁻¹ pour le sol global, de 5,29 à 6,81 cmol.Kg⁻¹ pour le sol rhizosphérique, de 7,3 à 9,3 cmol.Kg⁻¹ pour le rhizoplan toutes doses confondues (Tableau 17). La CEC est significativement ($p \leq 0,001$) plus élevée dans les rhizoplans pour tous les traitements (Figure 32). Divers auteurs, dans des conditions de climat et de sol diverses, et pour différentes espèces de plantes ont obtenu des résultats similaires (Gobran et al., 1998 ; Chen et al., 2002 ; Chiu et al., 2002, Turpault et al., 2005, 2007 et Dinesh et al., 2010). Cet accroissement de la CEC à proximité de la racine trouve son explication dans l'augmentation du taux de matière organique et des argiles (Violante et al., 1998; Chen et al., 2002; Chiu et al., 2002 Watteau et al., 2006), mais aussi dans une certaine mesure à la nature de la matière organique du rhizoplan (Turpault et al., 2007).

Malgré que le sol rhizosphérique s'appauvrisse en CEC comparativement au sol global et au rhizoplan pour NPK₁, NPK₂ et NPK₃ (Figure 32), le test de Newman et Keuls classe le sol global et le sol rhizosphérique dans un même groupe, différent de celui du rhizoplan. Dans le cas de la CEC, il semblerait que la zone d'influence de l'activité de la racine ne dépasserait pas le rhizoplan.

La CEC diminue significativement ($p \leq 0,001$) avec l'augmentation des doses d'engrais potassiques pour toutes les fractions de sol (Figure 32). L'effet le plus important des engrais est observé sur le sol global et avec l'augmentation des doses de potassium apportées (Figure 32). L'enrichissement de la solution du sol en potassium par les engrais potassiques a pour conséquence une saturation plus importante des sites préférentiels pour le potassium (Beckett, 1963) qui entrent pour une large part dans la fixation du potassium par les sols (Mengel, 1995). La fixation du potassium provoque le rapprochement des feuillets d'argiles de type illite et/ou vermiculite. Par ce processus les sites planaires et interfoliaires peuvent devenir interchangeables par la réorganisation des cavités hexagonales (Robert, 1992) ce qui entraîne une perte d'échangeabilité du potassium. Barbier (1962) ; Beckett (1980) expliquent que la

diminution de la CEC est proportionnelle à la quantité de potassium fixée par les argiles du sol. Le fait que le rhizoplan soit moins affecté par la diminution de la CEC due à la fixation du potassium s'explique par les taux de matière organique plus élevés dans cette fraction de sol qui limiteraient la fixation mais qui peuvent aussi masquer une diminution de la CEC par une augmentation des sites négatifs due à l'accumulation de matière organique dans cette fraction de sol.

2.3.2. Accroissement du pH à l'interface sol racine

Les résultats de la mesure du pH sont présentés dans le tableau 15 pour le sol naturel et dans le tableau 17 pour les sols fertilisés. Le pH des sols étudiés est acide à légèrement neutre, il varie de 5,28 à 6,5. Après trois années, une importante diminution du pH de l'ordre d'une unité, se maintient dans le sol global et le sol rhizosphérique du sol témoin (apport d'engrais azotés et de superphosphates) comparativement au sol naturel. Cette acidification trouve son explication dans la nitrification d'ions NH_4^+ qui sont apportés par l'engrais azoté (ammonitrate) appliqué. Majdi et Bergholm (1995) qui ont étudié l'effet de doses croissantes d'ammonitrate et de sulfates sur la chimie de la rhizosphère de peuplement de *Picea abies* L. en Suède indiquent que l'ampleur du changement du pH du sol varie en fonction de la proportion d'ammonium des engrais azotés apportés qui peut être nitrifié dans le sol. Après trois années, il semblerait qu'une certaine quantité d'ammonium existerait encore dans les sols et continuerait à se minéraliser.

Pour tous les traitements, le pH est significativement ($p \leq 0,001$) supérieur dans les rhizoplans (Tableau 17, Figure 32). Cette augmentation du pH à proximité immédiate de la racine a déjà été signalée par Bagayoko et al., (2000) pour une culture de millet avec une élévation du pH dans la rhizosphère de 1,9U de pH en début de culture et par Turpault et al., (2007) dans la rhizosphère du douglas. Weligama et al., (2008) observent une alcalinisation de la rhizosphère d'une culture de blé fertilisé par application localisée de N et P. L'augmentation relative du pH à proximité immédiate de la racine de l'olivier, zone d'absorption intense des nutriments, comparativement au sol global et rhizosphérique, pourrait s'expliquer par un prélèvement plus important d'anions en l'occurrence les anions nitrates et phosphates. En effet, la différence de pH entre la rhizosphère et le sol global va dépendre en grande partie du rapport cations/anions (Vetterlein et Reinhold, 2004), et de la forme d'azote prélevée (Turpault et al., 2005).

L'absorption de NO_3^- et des ions phosphates à proximité de la racine s'accompagne d'une exsorption de OH^- par la racine pour rétablir l'équilibre ionique dans le milieu cellulaire avec pour conséquence l'augmentation du pH à proximité de la racine (Darrah 1993 ; Davet 1996 ; Hinsinger 1998 ; Hinsinger et al., 2003). Cette élévation de pH dans le rhizoplan présente la plus forte amplitude pour le témoin (NPK_0) et la zone enrichie avec une dose de potassium (NPK_1) soit 0,87 et 0,80U de pH respectivement. Les plus faibles amplitudes de variation de pH sont observées au niveau du sol naturel (0,14U de pH) et des doses NPK_2 et NPK_3 (0,34 et 0,56U de pH). Il semblerait qu'avec l'apport d'engrais potassiques le rhizoplan aurait tendance à moins s'alcaliniser. Le prélèvement plus important du potassium par la racine dans les zones enrichies en K, pourrait diminuer le rapport anion/cation prélevé.

Jackson et Adams (1963) montrent que le potassium et le sodium sont absorbés indépendamment des anions. Delvaux et al., (2005) précisent qu'une importante absorption de potassium et d'ammonium induit une forte libération de H^+ par les racines de bananes. Ainsi, l'absorption plus importante de potassium par la racine de l'olivier avec libération concomitante de H^+ pour rétablir l'équilibre ionique dans la cellule limiterait l'élévation du pH dans le rhizoplan due à la libération de OH^- et HCO_3^- . D'autre part, l'acidité due à des quantités de matière organique plus élevées dans les rhizoplans des sols fertilisés avec le potassium pourrait modérer les augmentations de pH.

L'activité de la racine de l'olivier en présence d'ammonitrate et de phosphates limiterait la diminution du pH causée par l'apport d'engrais azoté au sol global et ceci afin de maintenir un pH plus adéquat pour le développement de la culture de l'olivier. Des pH trop acides auraient pour conséquence une concentration de H^+ plus élevée dans la solution du sol entraînant ainsi un accroissement de la lixiviation des bases et du calcium en particulier, or l'olivier est très sensible à toute carence en cet élément (Loussert et Brousse, 1978). D'ailleurs, le C.O.I. (1997) recommande que l'apport de ce macroélément soit dûment assuré dans le cas des sols acides. Cette élévation de pH serait une réponse physiologique de l'olivier pour réguler le pH dans l'environnement racinaire.

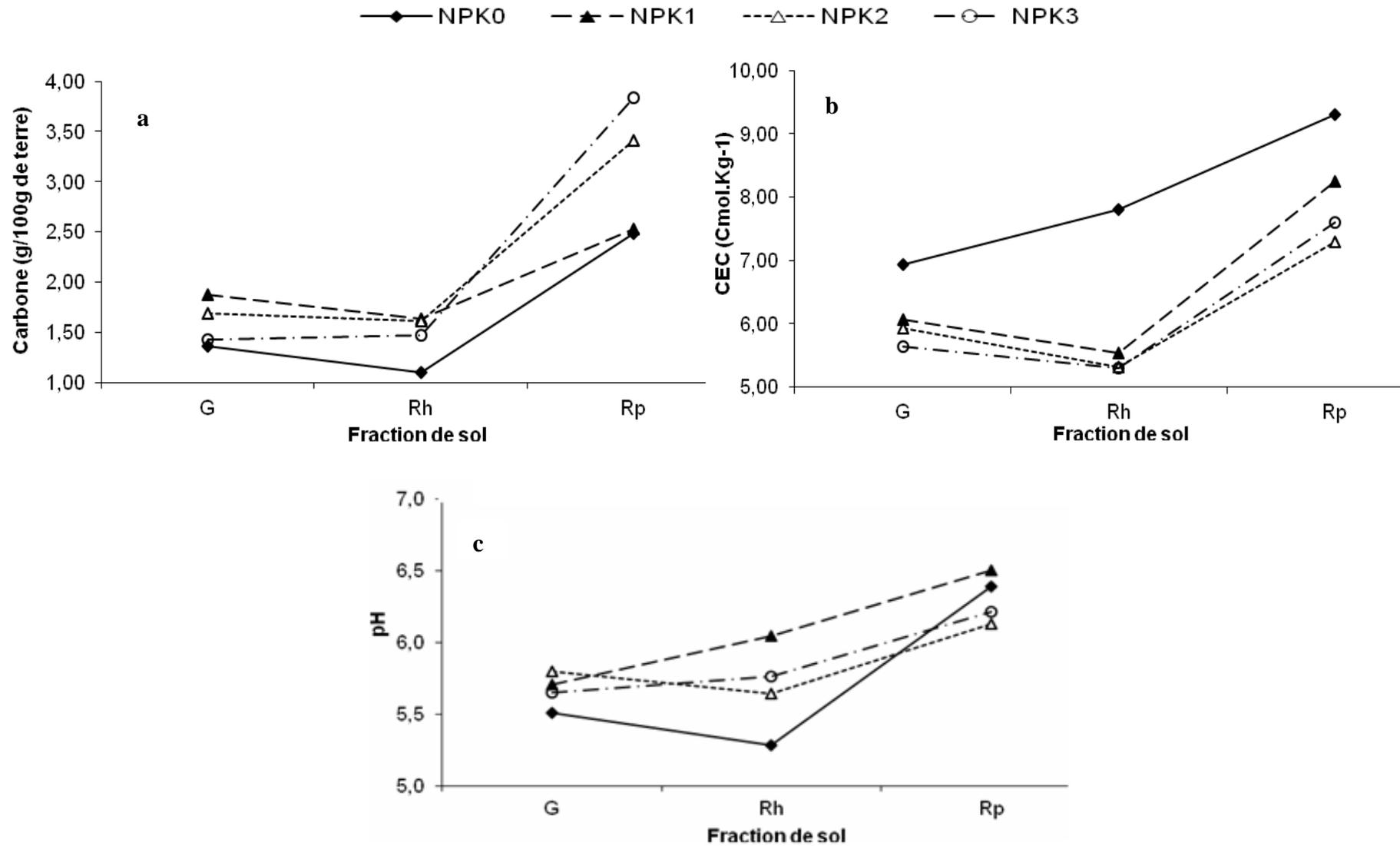


Figure 32 Accroissement du taux de carbone (a), de la CEC (b), du pH (c) dans les rhizoplans

2.4.Appauvrissement en potassium de la rhizosphère avec l'application d'engrais potassiques

2.4.1. Potassium soluble et assimilable

Les teneurs en potassium soluble et assimilable sont présentés dans le tableau 17. Alors que les concentrations en potassium soluble dans l'eau sont souvent faibles dans les sols, ce pool de potassium est celui qui est directement absorbé par les cultures (Jallali 2010). Le potassium soluble varie de 1,46 à 17,84 mg/100g de terre dans les sols globaux, de 1,43 à 9,6 mg/100g de terre dans les sols rhizosphériques et de 2,20 à 11,15 mg/100g de terre dans les rhizoplans (Tableau 17). Les trois fractions de sols sont enrichies en potassium soluble sous l'effet d'apport d'engrais comparativement au sol naturel, avec un effet beaucoup plus marqué avec les engrais potassiques, en particulier sur les sols globaux et sur les rhizoplans (Figure 33.a).

La rhizosphère s'appauvrit significativement ($p \leq 0,001$) en potassium soluble comparativement au sol global et ceci pour les doses $N_1P_1K_3$, $N_1P_1K_2$ et $N_1P_1K_1$. Par contre pour le témoin (NPK_0), il semblerait que le rhizoplan (Figure 33.b) s'enrichirait en potassium soluble malgré que le test de Newman et Keuls, classe le potassium soluble des trois fractions de sols dans le même groupe, ce qui indiquerait qu'en absence d'apports d'engrais potassique, la racine présenterait une influence plus limitée sur le potassium soluble à l'interface sol-racine.

Si l'on compare les teneurs en potassium soluble du sol sans aucune fertilisation (sol naturel) (Tableau 15) à celles du potassium soluble du témoin, ces dernières sont plus élevées. L'ammonium contenu dans l'engrais azoté utilisé (50% d'ammonium) pourrait avoir déplacé le potassium du complexe adsorbant, qui libéré dans la solution du sol viendrait enrichir cette dernière en potassium soluble. Clegg et Gobran (1997) observent le même effet sur un sol forestier lorsqu'ils fertilisent avec du sulfate d'ammonium un peuplement d'épinettes de Norvège. De même, Wang et al., (2010), observe que l'addition seul de sulfate d'ammonium augmentait le potassium soluble mais diminuait le potassium échangeable.

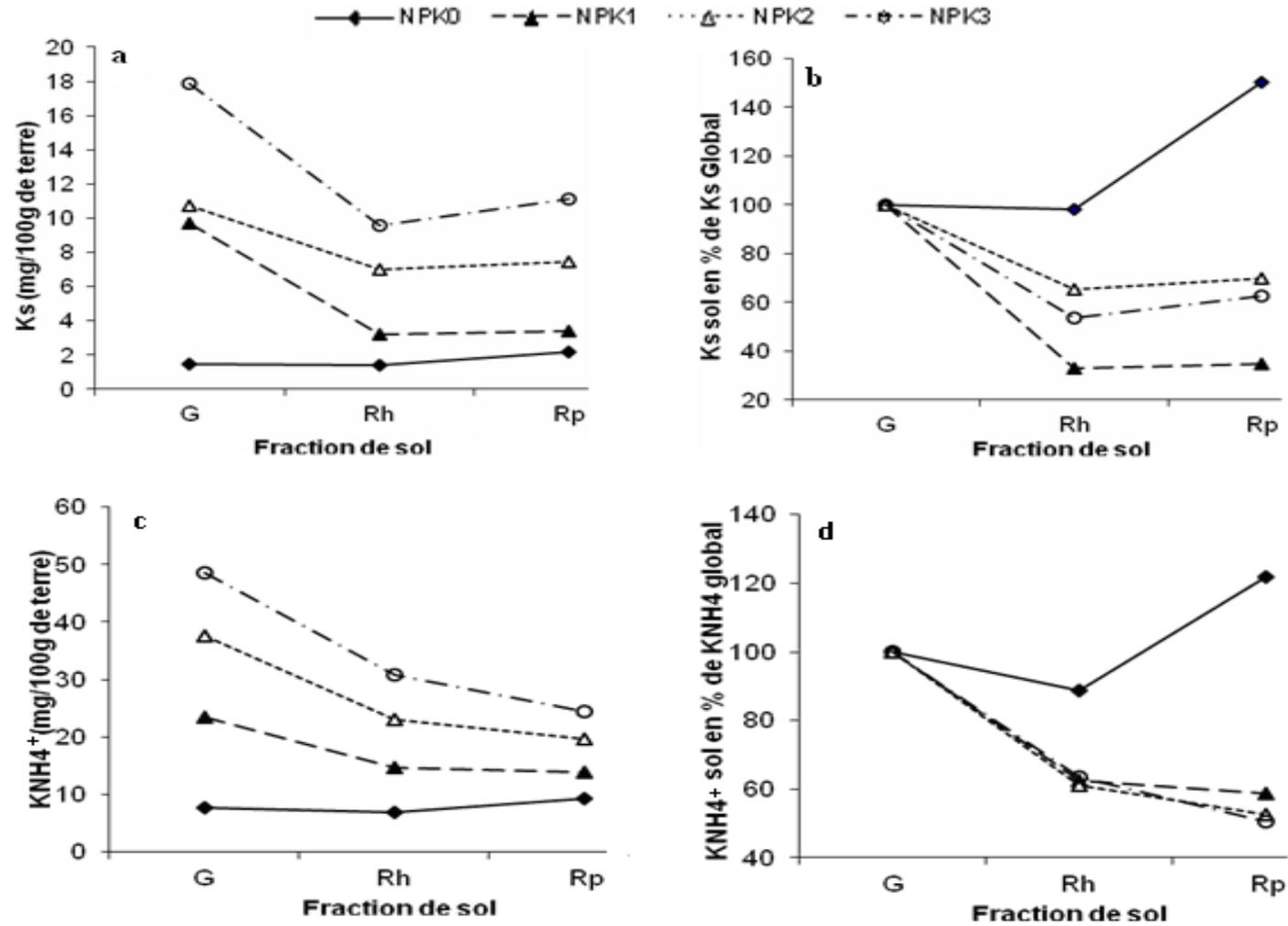


Figure 33 Teneurs en KS et KNH₄ dans les trois fractions du sol (a, c). Appauvrissement relatif de la rhizosphère en KS et KNH₄ des sols fertilisés avec du potassium (b, d), et léger enrichissement en KS et KNH₄ du rhizoplan du NPK₀.

L'apport d'engrais potassiques a augmenté significativement ($p \leq 0,001$) les teneurs en potassium assimilable au niveau de toutes les fractions de sol (Figure 33.c). Le potassium assimilable évolue de 7,68 à 48,67 mg/100g de terre dans les sols globaux, de 6,82 à 30,8 mg/100g de terre dans les sols rhizosphériques et de 9,35 à 24,52 mg/100g de terre dans les rhizoplans. Le sol global, le sol rhizosphérique et le rhizoplan du témoin présentent des teneurs en potassium assimilable plus faibles que celles des 3 fractions du sol naturel (Tableau 15 et Tableau 17). Ceci vient confirmer la libération de potassium du complexe adsorbant en échange de l'ammonium, ce qui conduit à un enrichissement de la solution du sol en potassium soluble et une diminution du potassium échangeable sur le complexe d'échange au niveau du sol témoin.

Le rhizoplan du sol naturel s'enrichit en potassium assimilable (Tableau 16). Pour le témoin (NPK₀), malgré que le rhizoplan semble s'enrichir en potassium assimilable (Figure 33.d), le test de Newman et Keuls, classe le potassium assimilable des trois fractions de sols dans le même groupe. L'effet de la racine sur le potassium assimilable du sol à sa proximité immédiate reste limité dans le cas de NPK₀. Par contre, on assiste plutôt à l'établissement d'un gradient significatif ($p \leq 0,001$) d'appauvrissement en potassium extractible à l'acétate d'ammonium du sol global vers la racine pour les sols fertilisés avec des engrais potassiques). La tendance est la suivante pour les 3 doses croissantes d'engrais potassiques : KNH_4^+ global > KNH_4^+ rhizosphérique > KNH_4^+ rhizoplan.

La magnitude de l'appauvrissement semblerait dépendre du statut initial potassique du sol, plus le sol global est enrichi en potassium, plus la différence entre le sol global et le rhizoplan ou autrement dit l'amplitude d'appauvrissement du sol global est importante. Cet appauvrissement en KNH_4^+ est de 24,14, 17,84 et 9,46 mg/100g de terre pour les doses NPK₃, NPK₂ et NPK₁ respectivement. L'application de doses croissantes de potassium induit une augmentation du prélèvement de potassium par l'olivier ou autrement dit plus le niveau de potassium assimilable est élevé dans le sol global, plus la diminution dans le rhizoplan est importante. Sharma et al., (2010) observent que c'est avec la dose maximale de potassium appliquée que le prélèvement du potassium par une culture de maïs est le plus important.

L'analyse statistique révèle un effet sol, un effet dose et une interaction sol-traitement très hautement significatifs pour le potassium extractible à l'acétate d'ammonium (Tableau 17). En absence d'engrais potassiques (témoin), le KNH_4^+ pour les 3 fractions de sols est semblable. En présence de doses croissantes d'engrais potassiques, l'activité de la racine

conduit à une diminution significative ($p \leq 0,001$) du potassium dans la rhizosphère. Gargouri et Mhiri (2002) indiquent qu'une teneur de 8mg de K/100g de terre de potassium assimilable pour des sols avec moins de 15% d'argiles est suffisante pour la culture de l'olivier, au dessus de cette quantité d'argiles plus de 15mg de K/100g de terre sont nécessaires. Malgré l'accroissement en potassium assimilable de la rhizosphère du sol du témoin (Tableau 17), cela n'a pas suffi à ramener le sol rhizosphérique et le rhizoplan à un niveau adéquat en potassium assimilable pour la culture de l'olivier.

L'apport d'azote et de phosphore seuls a conduit à un appauvrissement en potassium assimilable dans ce sol comparativement au sol naturel. Pour la dose NPK₁, seul le sol global est suffisamment pourvu en potassium assimilable, le sol rhizosphérique et le rhizoplan sont appauvris en potassium assimilable mais restent proches du niveau optimal. Pour la dose NPK₂ et NPK₃, les trois fractions de sols sont au dessus du niveau adéquat en potassium assimilable malgré un appauvrissement important du sol rhizosphérique et du rhizoplan en raison de l'absorption racinaire du potassium par l'olivier.

Cet appauvrissement pourrait être lié à l'amélioration du statut nutritionnel des arbres fertilisés, ce qui pourrait conduire à une augmentation du rendement en olives mais aussi à l'accroissement de la biomasse aérienne, donc à une demande plus élevée en éléments nutritifs du sol. L'ampleur de l'épuisement en potassium des sols enrichis avec des engrais potassiques reflète l'intensité de l'absorption racinaire et de la croissance de l'arbre. En effet, en plus d'une prolifération racinaire (Hodge et al. 2009), la réponse à des zones enrichies inclut aussi une stimulation de l'absorption racinaire (Robinson, 2001). Craine et al. (2003) observent une forte corrélation entre l'appauvrissement en eau et en azote minéral ($N-NO_3^-$ et $N-NH_4^+$) du sol rhizosphérique et la biomasse de racine par volume de sol d'espèces de prairie. Par contre, dans le cas du sol naturel et de celui du témoin l'olivier semble s'adapter à un sol pauvre en potassium probablement en réduisant le prélèvement du potassium et ainsi limite l'épuisement de la rhizosphère, mais aussi en prospectant un plus grand volume de sol. Van Breemen (1995) explique que certaines espèces végétales qui sont adaptées à des sols pauvres en nutriments se caractérisent par un faible taux d'absorption en éléments nutritifs du sol.

2.4.2. Diminution du taux de saturation en potassium dans la rhizosphère

Le potassium soluble à l'eau représente entre 19,5% et 46,6% du potassium extractible à l'acétate d'ammonium pour le témoin et le rhizoplan de NPK₃ respectivement. Cette variation importante pourrait s'expliquer par une solubilisation incomplète des engrais dans les sols en raison de longues périodes de sécheresse sous climat méditerranéen. Nous avons pu observer au cours de l'échantillonnage des sols qu'une fraction des engrais était encore présente trois ans après la mise en place du dispositif expérimental. Il était difficile de séparer les engrais non solubilisé de la masse de sol. Le taux de saturation en potassium correspond au rapport K_{ex}/CEC . Nous avons opté pour le calcul de K échangeable de soustraire le K soluble à l'eau du KNH_4^+ , ceci afin d'éviter le calcul de taux de saturation en potassium trop élevés qui serait dus non pas à une occupation des sites d'échanges par le potassium mais principalement à l'augmentation des concentrations en potassium soluble à l'eau.

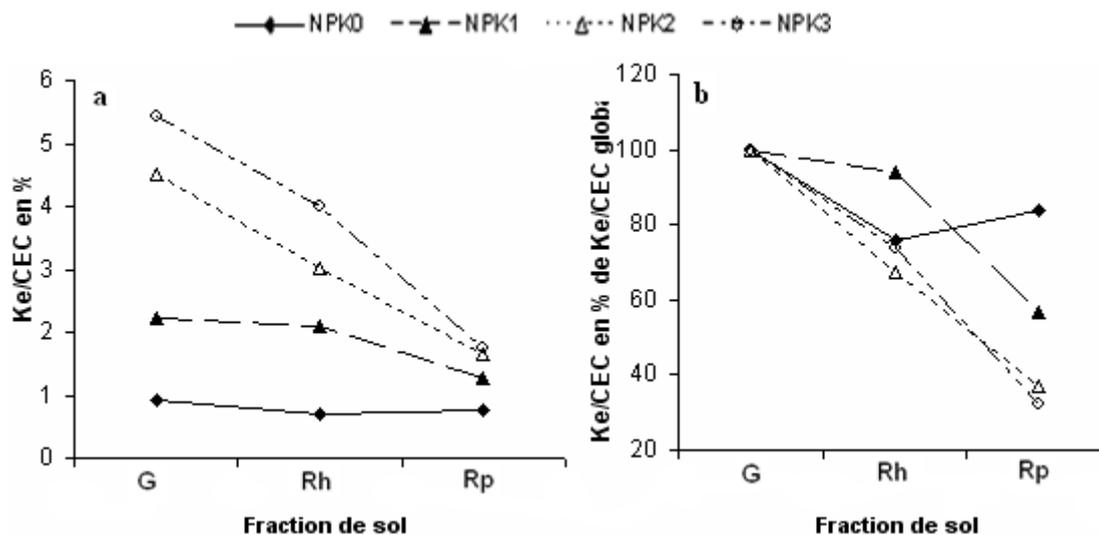


Figure 34 Taux de saturation en potassium dans le sol global, le sol rhizosphérique et le rhizoplan de l'olivier pour les différentes doses d'application (a). Diminution relative du taux de saturation en potassium de la rhizosphère des sols fertilisés avec du potassium, légère augmentation du taux de saturation en potassium de la rhizosphère en absence d'application de potassium (b).

Addiscott (1970) soulignent que le pouvoir tampon d'un sol vis-à-vis du potassium est fonction du rapport entre le potassium échangeable et la capacité d'échange cationique (K/CEC). K_{ex}/CEC varie pour les sols globaux de 0,91% pour le témoin à 5,43% pour la dose NPK₃, pour les sols rhizosphériques de 0,65% pour le témoin à 4% pour NPK₃, pour les rhizoplans de 0,76% pour le témoin à 1,75% pour NPK₃ (Tableau 17).

L'application de doses croissantes d'engrais potassiques augmente significativement ($p \leq 0,001$) K_{ex}/CEC pour toutes les fractions de sols (Figure 34 a, Tableau 17) avec un effet plus marqué pour les sols globaux des traitements NPK₂ et NPK₃.

L'activité de la racine en l'occurrence le prélèvement racinaire par l'olivier détermine un gradient de diminution de Kex/CEC significatif ($p \leq 0,001$) du sol global vers la racine. En effet, pour les 3 doses d'apport d'engrais potassiques le taux de saturation en potassium du complexe d'échange suit la tendance suivante Kex/CEC du sol global > Kex/CEC du sol rhizosphérique > Kex/CEC du rhizoplan. Cette diminution du taux de saturation en potassium échangeable à proximité de la racine indiquerait que la racine prélève sur le pool de potassium extractible à l'eau, ce qui serait suivi d'un déplacement de potassium échangeable vers la solution du sol pour rééquilibrer cette dernière en potassium.

Comme pour le potassium soluble et le potassium assimilable une légère augmentation du taux de saturation en potassium est observée à proximité des racines des oliviers fertilisés avec NPK₀ (Figure 34.b). Cependant, le test de Newman et Keuls classe le Kex/CEC du sol global, du sol rhizosphérique et du rhizoplan de NPK₀ dans un même groupe, ce qui indiquerait que lorsque le niveau de potassium dans le sol global est en dessous d'un certain seuil de richesse, le prélèvement racinaire de l'olivier reste limité.

3. Mobilisation du potassium non échangeable dans la rhizosphère en relation avec le statut potassique du sol global

Le KHNO₃ réunit l'ensemble des pools de potassium biodisponible ($K_S + KNH_4^+ + K_{ne}$). Les teneurs en KHNO₃ sont présentées dans le tableau 17. Elles varient pour les sols globaux de 79 à 163,3 mg/100g de terre, de 72,23 à 112,1mg/100g de terre pour les sols rhizosphériques et de 85,97 à 110,08 mg/100g de terre pour les rhizoplans.

L'application d'engrais potassiques associée à l'activité de la racine a diminué significativement ($p \leq 0,01$) la quantité de potassium lentement biodisponible à l'interface sol-racine (Figure 35 a). A l'opposé, en absence d'engrais potassiques, pour des sols appauvris en potassium, l'interaction sol/engrais a amélioré significativement ($p \leq 0,01$) la teneur en potassium lentement biodisponible dans le rhizoplan. La tendance générale est semblable à celles du potassium soluble et assimilable, à savoir un enrichissement de l'ensemble des fractions de sols en KHNO₃ (Figure 35.a) avec l'apport d'engrais potassiques. Par contre, comme pour le KNH_4^+ et le K_S un gradient d'appauvrissement en potassium extractible à l'acide nitrique est observé dans la rhizosphère des sols fertilisés avec des engrais potassiques, alors qu'en absence d'application d'engrais potassiques (NPK₀) (Figure 35.b), un gradient d'enrichissement en KHNO₃ est observé du sol global vers le rhizoplan. Cependant, malgré cet enrichissement de la rhizosphère, les teneurs en KHNO₃ du sol rhizosphérique et du

rhizoplan du témoin restent largement inférieures à celles des sols des oliviers fertilisés avec des engrais potassiques. La diminution significative ($p \leq 0,001$) du KHNO_3 du sol global sous l'effet de l'activité de la racine des oliviers fertilisés semblerait liée à la dose d'apport d'engrais. En effet, la plus forte diminution de KHNO_3 est mesurée sur le rhizoplan de NPK_3 (53,3mg/100g de terre), comparativement à NPK_2 (23,50 mg/100g de terre) et NPK_1 (20,88 mg/100g de terre).

Le potassium non échangeable correspond au KHNO_3 minoré du KNH_4^+ . Ce pool de potassium est lentement disponible comparativement au potassium extrait à l'eau et à l'acétate d'ammonium. Cependant son rôle dans la capacité d'un sol à fournir du potassium n'en est pas moindre pour autant. A long terme, la libération de potassium non échangeable permet de remplacer en partie le potassium échangeable prélevé par les cultures ou perdu par lexiviation. Les résultats (Tableau 17) montrent l'accroissement des teneurs en potassium non échangeable avec celui des doses d'engrais potassiques au niveau de tous les sols étudiés (Figure 35.c).

La fluctuation des teneurs est de 71,35 à 114,63 mg/100g pour les sols globaux, de 65,39 à 81,23 mg/100g pour les sols rhizosphériques et de 76,61 à 85,55 mg/100g de terre pour les rhizoplans.

La tendance générale est semblable à celle des autres pools de potassium, en l'occurrence, un appauvrissement en Kne dans la rhizosphère des arbres fertilisés avec cependant, une accumulation relative du potassium en position non échangeable dans le rhizoplan comparativement au sol rhizosphérique et ceci pour l'ensemble des doses (Figure 35.d).

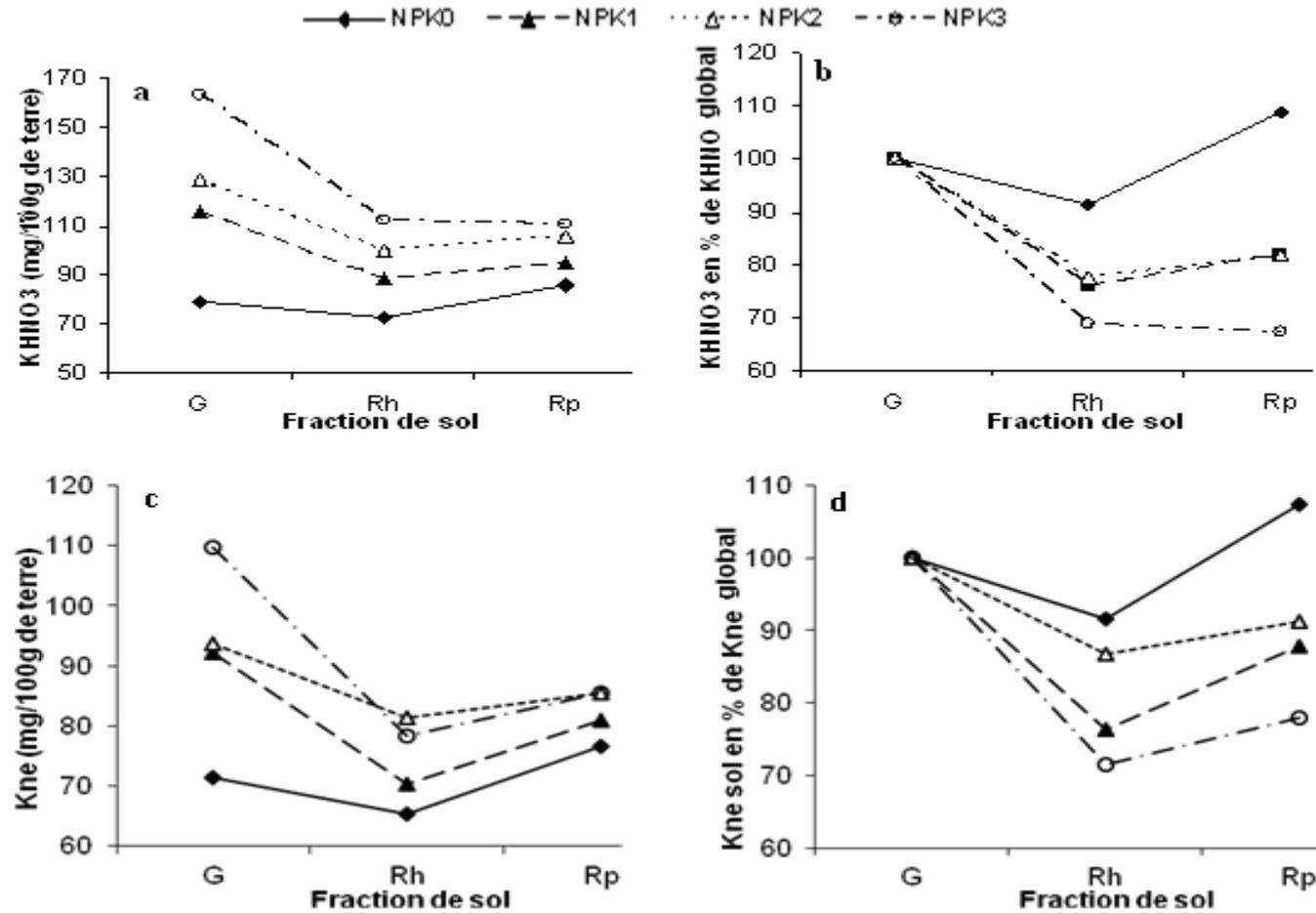


Figure 35 Teneurs en KHNO_3 dans le sol global, le sol rhizosphérique et le rhizoplan de l'olivier pour les différentes doses d'application (a). Appauvrissement relatif de la rhizosphère en KHNO_3 des sols fertilisés avec du potassium, enrichissement en potassium assimilable de la rhizosphère en absence d'application de potassium.

La magnitude de l'appauvrissement en Kne dans les sols fertilisés reste moins importante que celles du potassium soluble et assimilable. Néanmoins, il est intéressant de noter que cette réduction du pool non échangeable à proximité de la racine a lieu malgré que les niveaux en potassium assimilable soient optimaux pour NPK₂ et NPK₃. Il est généralement admis qu'un degré d'épuisement en potassium soluble en dessous d'un certain seuil de la solution du sol autour des racines et en contact avec la surface des argiles est un pré requis pour déclencher la libération du potassium inter foliaire ou non échangeable. Ces études ont souvent été menées sur des minéraux tests comme par exemple la biotite, la phlogopite et la muscovite et en absence d'apport de potassium à la solution nutritive (Hinsinger et al., 1993 ; Gregory 2006 ; Norouzi et Khademi 2010). Ces auteurs ont déterminé des seuils de concentration en potassium de la solution du sol en dessous desquels, il y a effectivement libération de potassium à partir de pool non échangeable, confirmé par ailleurs par une altération de ces minéraux révélée par la diffraction des RX. Concernant les sols, Hinsinger (1998) souligne que lors d'un prélèvement racinaire, si la concentration en potassium en solution venait à diminuer à un niveau critique, il se produirait une libération du potassium non échangeable des positions inter foliaires des minéraux pour compenser les quantités perdues. Ceci ne semblerait pas être le cas pour la rhizosphère d'oliviers fertilisés, pour lesquels une libération de potassium non échangeable se produit malgré de fortes concentrations en potassium soluble et échangeable.

Plus récemment, Sharma et al., (2010) ont aussi mesuré une plus grande libération du potassium non échangeable de sols d'une culture de *Zea mays* L. Dans le cas du sol fertilisé avec la dose d'apport de potassium la plus élevée. Ces auteurs concluent que plus le statut initial en potassium assimilable était élevé, plus la mobilisation du potassium à partir de pool non échangeable est importante. Benipal et Parricha (2002) trouvent une relation significative et positive entre le niveau initial de potassium extractible à l'acétate d'ammonium des sols et le potassium non échangeable du sol prélevé par des cultures de maïs et de blé. Cette relation indique que le maximum de potassium non échangeable est libéré par le sol dont le niveau de KNH_4^+ était le plus élevé.

L'addition de N et P dans les zones de sols enrichies en doses croissantes de potassium a amélioré la fertilité des sols créant ainsi un milieu plus propice à un bon développement de l'olivier, ce qui induirait un prélèvement plus important du potassium. L'olivier prélève sur les pools immédiatement disponible (K_s) et échangeable, lesquels sont réalimentés par une libération du potassium à partir du pool non échangeable.

4. Relations existant entre les propriétés des sols, les différents pools de potassium et le potassium foliaire

La CEC, les formes de potassium biodisponibles (K_S , KNH_4^+ , $KHNO_3$, K_{ne}) du sol global sont corrélées significativement et positivement à celles du rhizoplan (Tableau 18). Ceci indique qu'un accroissement de la CEC ou d'un pool biodisponible de potassium dans le sol global induit un accroissement de ces propriétés à proximité immédiate de la racine. Ainsi, malgré que des différences significatives entre la CEC et les pools biodisponibles du potassium du sol global et du rhizoplan aient été établies, des mesures de ces propriétés sur le sol global permettraient des extrapolations sur le rhizoplan. Ce qui précède, laisse supposer que toute action visant à améliorer ces propriétés dans le sol global pourraient avoir un impact positif sur ces mêmes caractéristiques du sol à proximité de la racine. Parmi ces actions, l'enrichissement en potassium du sol global dans le cas de la mise en place de zones enrichies en éléments nutritifs en est un bon exemple. Par contre, le carbone et le pH du sol global ne sont pas corrélés avec le carbone et le pH du rhizoplan. Pour ces deux caractéristiques du sol, l'amplitude de leur changement due à l'activité de la racine de l'olivier est suffisamment importante pour qu'elles ne soient plus liées à celles du sol global.

K_S et KNH_4^+ sont significativement corrélés avec la matière organique du rhizoplan (Figure 36 a,b), ces relations n'existent ni dans le sol rhizosphérique ni dans le sol global. Ces corrélations pourraient s'expliquer par l'accroissement du pool de matière organique dans le rhizoplan qui induit une augmentation du nombre de sites d'échanges disponible pour le potassium.

Nous n'avons pas trouvé de corrélations significatives entre le potassium foliaire et les formes biodisponibles du potassium dans les deux fractions de sols. Des résultats similaires sont trouvés par Gargouri et Mhiri (2002) pour des oliveraies tunisiennes. Le potassium serait distribué dans les différents organes de l'arbre. En effet Gálvez et al., (2004) ont montré des corrélations significatives entre le potassium assimilable de la zone racinaire et la canopée et le diamètre des troncs.

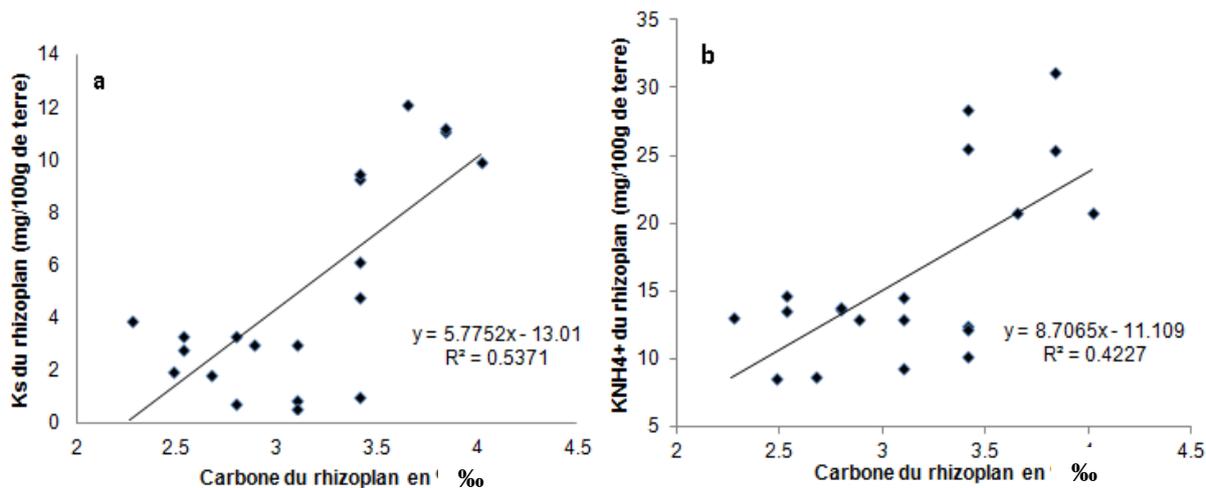


Figure 36 Relation entre le carbone organique et le KS (a) et le KNH_4^+ (b) du rhizoplan.

5. Dynamique des différentes formes de potassium dans la rhizosphère

L'ensemble de corrélations positives et significatives entre les différents pools de potassium dans les trois fractions de sol indiquent que le KS, le KNH_4^+ , le Kne sont en équilibre dynamique (Tableau 19).

Dans le sol au repos, ces formes de potassium sont en équilibre entre elles, mais il existe entre chaque phase des relations plus ou moins réversibles qui vont intervenir dès l'instant où l'on va modifier les quantités d'une ou plusieurs formes, soit par un apport d'engrais, soit par les prélèvements racinaires (Bosc 1988). Un ensemble de réactions se produit alors, impliquant un déplacement de l'équilibre initial. Après une fertilisation, la teneur en potassium de la solution augmente, un équilibre s'établit rapidement entre la forme soluble et la forme échangeable, mais une partie de potassium subira une fixation pour augmenter la teneur en K de réserve (Quemener, 1986). A l'inverse le prélèvement racinaire et/ou la lixiviation produira une libération du potassium non échangeable des positions interfoliaires des minéraux pour compenser la perte de potassium. Après 3 années, le sol global fertilisé peut être considéré comme un sol au repos, ce qui expliquerait les fortes corrélations entre les différents pools de potassium, synonyme de l'établissement d'un équilibre entre les pools biodisponible du potassium. Par contre, il est intéressant de noter que les corrélations deviennent moins fortes en allant vers la racine, ce qui signifierait que l'activité de la racine de l'olivier principalement par le prélèvement de potassium modifierait l'équilibre entre les différents pools de potassium (Tableau 19).

Tableau 18 : relations entre certaines propriétés chimiques des trois fractions de sols (n=20)

CEC (cmol*kg ⁻¹)	KS (mg/100g de terre)	KNH₄⁺ (mg/100g de terre)	Kne (mg/100g de terre)	KHNO₃ (mg/100g de terre)
CECG * CECRH = 0,69***	KSG * KSRH = 0,93***	KNH ₄ ⁺ G * KNH ₄ ⁺ RH = 0,94***	KneG * KneRH = 0,80***	KHNO ₃ G * KHNO ₃ RH = 0,87***
CECG * CECRp = 0,76***	KSG * KSRp = 0,86***	KNH ₄ ⁺ G * KNH ₄ ⁺ Rp = 0,81***	Kne * KneRp = 0,60**	KHNO ₃ G * KHNO ₃ Rp = 0,78***
CECRH * CECRp = 0,80***	KRH * KSRp = 0,89***	KNH ₄ ⁺ RH * KNH ₄ ⁺ Rp = 0,74***	KneRH * KneRp = 0,56**	KHNO ₃ RH * KHNO ₃ Rp = 0,53*

Tableau 19 : Relations entre les différents pools de potassium dans les 3 fractions de sols (n=20)

Sol global	sol rhizosphérique	rhizoplan
KNH ₄ ⁺ * KS = 0,92***	KNH ₄ ⁺ * KS = 0,97***	KNH ₄ ⁺ * Kne= 0,65***
KS * Kne= 0,83 ***	KS * Kne= 0,69***	KS * Kne= 0,58**
KNH ₄ ⁺ * Kne= 0,84***	KNH ₄ ⁺ * Kne= 0,67***	KNH ₄ ⁺ * Kne= 0,46*

6. Pertinence agronomique de la localisation des engrais pour des oliveraies de montagne

Dans les sols, les racines sont confrontées à une importante hétérogénéité spatiale et temporelle des éléments nutritifs et de l'eau. En plus de l'hétérogénéité des ressources, le système racinaire est confronté à la différence de mobilité des ions nutritifs (Doussan et al. 2003). Les nitrates qui sont relativement mobiles (mobilité de l'ordre du centimètre), le potassium qui l'est moins (mobilité de l'ordre de quelques millimètres) sont prélevés par les racines par mass flow et diffusion. Le phosphore qui diffuse plus lentement, en raison de sa forte rétention par les sols, nécessite pour son prélèvement que la racine ou les mycorhizes qui lui sont associées accède aux zones de sols enrichies en phosphore. Dans le cas du sol naturel non fertilisé, le système racinaire de l'olivier doit interagir avec les contraintes du sol (nutriments, eau, structure...) pour accéder aux ressources. Ce-ci implique une exploration continue de nouvelles zones où les nutriments les moins mobiles, comme par exemple le potassium n'ont pas déjà été épuisés. Cette exploration entraîne une plus grande quantité de carbone alloué aux racines afin de développer le système racinaire et/ou maximiser les processus de la rhizosphère (telle la rhizodéposition) pour améliorer la biodisponibilité des éléments nutritifs. Cette stratégie qui consiste en une exploration souvent horizontale d'un volume de sol plus conséquent va favoriser la productivité de l'individu mais à longue échéance induira une baisse de la productivité de l'ensemble de l'écosystème (Van Noordwijk et al., 1998), et dans notre cas de l'agro système oliviers.

Dans l'objectif d'une amélioration de la production oléicole, la fertilisation potassique selon un mode d'apport localisé peut présenter certains avantages. L'interaction avec les contraintes du sol est réduite, ce qui entraîne une absorption plus régulière des nutriments. La prolifération du système racinaire dans les zones enrichies en nutriments accroît le prélèvement des éléments nutritifs, ce qui peut peut-être compenser l'approvisionnement irrégulier de ces nutriments à partir de l'ensemble du système racinaire. Des nutriments comme le phosphore et le potassium peuvent restés immobilisés au niveau des patches plusieurs mois voire plusieurs années. Les résultats montrent un gradient d'épuisement en potassium du sol global vers le rhizoplan pour les sols enrichis en potassium. Les processus de la rhizosphère associé à la localisation des engrais ont maximisé l'absorption du potassium par l'olivier. Dans les deux cas l'olivier semble s'adapter à la richesse du milieu en opposant deux stratégies différentes du système racinaire ; la première en milieu appauvri non fertilisé consiste à déployer son système racinaire à la recherche de zones enrichies en éléments

nutritifs. La seconde privilégie une prolifération racinaire dans les zones enrichies en potassium, azote et phosphore. L'amélioration du statut nutritionnel des oliviers fertilisés induit probablement une plus forte demande en éléments nutritifs, alors qu'à l'opposé, un statut nutritionnel caractérisé par des teneurs plus faibles en éléments nutritifs dans les feuilles conduirait l'olivier à limiter ses prélèvements. Ce mode d'apport nécessite la mise en œuvre de peu de moyens et reste à la portée d'oléiculteurs d'une région, la Kabylie, dont l'agriculture est à vocation de montagne.

7. Analyse critique du dispositif expérimental

Les engrais chimiques synthétiques sont des sels qui lorsqu'ils sont apportés au sol peuvent agir sur les niveaux de la conductivité électrique de la solution du sol. Ju et al., (2007) observent une augmentation des niveaux de la conductivité électrique de sol de serres avec l'application de doses importantes d'engrais. Les sels des engrais diffusent dans les sols et diminuent le potentiel osmotique du sol (Drew, 1975). La localisation des engrais, en particulier pour les fortes doses NPK₂ et NPK₃ conduit à l'augmentation de la concentration en solutés de la solution du sol et par conséquent à la diminution du potentiel osmotique du sol. Il pourrait en résulter une sécheresse physiologique qui peut se produire même à la capacité au champ, quoique que cet effet soit encore plus prononcé au cours de la saison sèche (Kozłowski, 1987). On pourrait améliorer le dispositif expérimental en assurant le suivi de la conductivité électrique dans les zones enrichies en éléments nutritifs.

L'alternance des oliviers peut masquer les effets bénéfiques de l'apport d'engrais. Il aurait été utile avant de lancer le dispositif expérimental de sélectionner les arbres en On et Off. Le suivi de ces arbres permettrait une estimation de l'effet bénéfique de la mise en place de zones enrichies en engrais sur la production des olives, de l'huile et de sa qualité mais aussi sur la réduction de l'alternance des oliviers.

8. Conclusion

La racine de l'olivier en présence d'engrais appliqués en mode d'apport localisé a contribué à améliorer le sol à sa proximité immédiate. En présence de l'application d'ammonitrate qui induit une diminution du pH dans le sol global, la racine de l'olivier réagit en élevant le pH en particulier au niveau du rhizoplan, ce qui suggère un réajustement du pH à proximité de la racine de l'olivier plus en accord avec les exigences édaphiques de cette espèce fruitière. L'interaction de la racine avec des sols enrichis par des doses croissantes

d'engrais potassiques a permis l'accroissement de la matière organique. Cet accroissement de la teneur en matière organique due à l'activité de la racine de l'olivier pourrait limiter la fixation du potassium.

De façon générale, l'application de doses croissantes de potassium accroît les 3 formes de potassium biodisponible sur toutes les fractions de sols avec un effet plus marqué sur le sol global.

Deux gradients inverses d'éloignement de la racine apparaissent sous l'effet de l'application d'engrais potassique. Le premier, un gradient d'enrichissement, dans les sols d'olivier déficients en potassium, montre une légère augmentation des formes biodisponibles du potassium dans la rhizosphère. Le second, le gradient d'appauvrissement, dans les sols enrichis en potassium, montre un épuisement en potassium dans le sol rhizosphérique et rhizoplan comparativement au sol global. Cette influence opposée de la racine sur les pools de potassium semblerait liée au statut initial potassique du sol global. Elle pourrait déterminer deux stratégies du système racinaire différentes. La première, dans le cas de sols appauvris en potassium, consisterait en un déploiement du système racinaire pour prospecter un plus grand volume de sol à la recherche des éléments nutritifs. Dans la seconde, dans le cas de sols enrichis en potassium, la racine appauvrit la zone enrichie mise à sa disposition.

Cette étude gagnerait à être approfondie par une meilleure caractérisation du système racinaire (biomasse, géométrie, élongation, quantité relative de racines fines absorbantes dans le cas de sols non fertilisés et de sols fertilisés).

Au cours de ce travail, nous n'avons évalué l'impact de l'application de doses croissantes de potassium sur une oliveraie qu'à l'aide du diagnostic foliaire. Il serait plus que nécessaire de récolter des données sur la production oléicole dans cette station afin de mieux rendre compte de l'utilité d'une application localisée des engrais et de déterminer la dose d'apport optimale afin d'éviter toute consommation de luxe du potassium par l'olivier.

La biodisponibilité du potassium dans les sols étant intimement liée à la minéralogie des argiles, c'est cette fraction du sol qu'il serait intéressant d'étudier en vue de comprendre, dans des conditions similaires, dans quelle mesure les argiles du sol peuvent être modifiées par l'activité de la racine.

E- Réponses de la minéralogie des argiles de la rhizosphère de *Olea europea* L. à l'apport croissant d'engrais potassiques.

Introduction

Dans le chapitre précédent nous avons observé une diminution des trois pools de potassium bio- disponible, le potassium soluble à l'eau, le potassium extractible à l'acétate d'ammonium, le potassium non échangeable à l'interface sol-racine de sols d'oliveraies fertilisées avec des apports croissants d'engrais potassiques. De plus, cette diminution du potassium biodisponible à proximité de la racine s'accroît avec la quantité d'engrais potassique appliquée.

Les différents pools de potassium dans les sols sont en relation avec les argiles du sol. Diverses études ont établi des relations étroites entre les pools de potassium du sol et la minéralogie des sols. Ghosh et Singh (2001) montrent que des sols riches en kaolinite libèrent moins de potassium extractible à l'acétate d'ammonium comparativement à des sols plus riches en illite et en interstratifiés illite/smectite. Sharma et al., (2010) déterminent la teneur en potassium non échangeable la plus élevée sur les sols les plus riches en illite. Le potassium non échangeable de sols de Nouvelle-Zélande s'accroît avec les quantités de mica et les interstratifiés mica/smectite, mais diminue avec les quantités de vermiculite (Surapaneni et al., 2002 ; Officer et al. 2006). Barré et al., (2008) ont déterminé une corrélation très hautement significative entre l'abscisse du centre de gravité (paramètre calculé sur la base de la décomposition des diffractogrammes des argiles du sol) et le potassium total dosé par fluorescence. D'autre part, divers auteurs ont montré que des pools de potassium tels que le potassium extractible à l'acétate d'ammonium et le potassium non échangeable étaient en étroite relation avec le prélèvement du potassium par les plantes (Barber, 1995 ; Goulding, 1987 ; Memon et al. 1988; Badraoui et al. 1992 ; Mengel et Uhlenbecker, 1993). On pourrait en déduire que les plantes par l'absorption racinaire du potassium auraient un impact sur les argiles du sol, en particulier sur celles du sol à l'interface sol-racine. Velde et Peck (2002) ont établi l'importance du rôle des plantes dans la modification de la minéralogie des argiles des sols. Hinsinger et al. (1993) ont observé une modification de la biotite et de la phlogopite sous l'effet du prélèvement du potassium par le ray grass. L'analyse par rayons X du substrat (biotite ou phlogopite) de la culture du ray grass a révélé l'apparition d'un pic à 1,4 nm au bout de 14 jours de culture. La fraction illitique des sols est fortement impliquée dans cette libération du potassium par les plantes (Barré et al. 2007 a).

A l'opposé, l'addition de potassium au sol provoque des modifications de la fraction argileuse qui sont révélées par l'analyse par diffraction des rayons X. La fixation du potassium en position interfoliaire par les argiles des sols augmente la quantité de feuillets illitiques. L'enrichissement en potassium par addition d'engrais potassiques à la fraction argileuse des sols et/ou son appauvrissement en potassium par prélèvement racinaire peut être mis en évidence par l'utilisation de la diffraction des rayons X.

Barré et al., (2007 b), par des expériences menées en conditions contrôlées, suggèrent que les feuillets d'illite constituent un réservoir de potassium pour les plantes. Ainsi, les feuillets d'illites se rempliraient lors d'addition de potassium au sol, et se videraient lorsque les plantes prélèvent du potassium. En conditions au champ, l'étude de la composition minéralogique des argiles des 42 parcelles de l'INRA de Versailles (Pernes Debuyser et al., 2003; Barré et al., 2008) a révélé que les argiles des sols des parcelles ayant reçu de la matière organique ou du KCl se sont enrichies en feuillets illitiques par fixation du potassium en position interfoliaire. Ces études ont permis de montrer la mise en réserve du potassium dans les conditions au champ. Des transformations de la minéralogie de la fraction argileuse de la rhizosphère d'espèces forestières en conditions naturelles sont souvent liées à la dynamique du potassium (libération-fixation) (April et Keller, 1990; Courcshene et Gobran, 1997 ; Gobran et al., 1998 ; Turpault et al., 2008). La principale conclusion à retenir de ces études menées au champ, est la nécessité de considérer le bilan potassique, c'est-à-dire de tenir compte à la fois de l'influence de l'application d'engrais potassiques et du rôle de l'activité de la racine sur la dynamique du potassium et sa relation avec les argiles des sols.

L'objectif de ce chapitre est d'étudier dans les conditions au champ l'évolution de la minéralogie de la fraction argileuse de sols soumis à des applications croissantes de potassium et à l'activité racinaire de l'olivier.

1. Matériels et méthodes

Les sols utilisés sont ceux échantillonnés dans le verger d'oliviers de Tizi Rached qui a reçu une fertilisation NPK selon un mode d'apport localisé. L'analyse des argiles a porté sur les sols globaux, les sols rhizosphériques et les rhizoplans de 20 oliviers. Ce dispositif permet d'induire un enrichissement important du sol en potassium et par conséquent une fixation importante du potassium par les sols globaux. En parallèle, il a aussi permis de mettre en évidence le prélèvement conséquent du potassium par les oliviers (chapitre 4). Les argiles recueillies par la méthode physique sont saturées au SrCl_2 0,5N. Seules les argiles du sol

naturel n'ayant pas reçues d'application d'engrais NPK sont saturées au KCl 1N. Les 72 échantillons orientés obtenus sont analysés avec un diffractomètre de marque Rigaku utilisant la radiation au cuivre. Les diffractogrammes sont collectés avec un pas de 0.05° pendant 3 secondes entre 4 et $35^\circ 2\theta$. Les diffractogrammes des argiles sont traités avec le logiciel Decom (Lanson, 1997).

1.1. Analyse statistique

Une analyse de la variance est réalisée sur les paramètres de la minéralogie de la fraction argileuse des trois fractions du sol naturel, ceci afin de déterminer un effet sol et un effet saturation au SrCl_2 0,5N et au KCl 1N. Une analyse de la variance est réalisée pour les argiles saturées au strontium des 3 fractions de sols fertilisés. L'analyse de la variance est conduite à l'aide du logiciel Statbox 6. En randomisation totale pour les argiles du sol naturel, et en carré latin pour les sols fertilisés à raison de 4 traitements avec 4 répétitions (4 arbres). Afin de déterminer l'existence de relations entre les propriétés chimiques et minéralogiques des trois fractions de sol, les coefficients de Pearson sont calculés par le logiciel Statistica 6.

2. Résultats et discussion

2.1. Propriétés des diffractogrammes des argiles du sol naturel

2.1.1. Identification des différents minéraux des argiles du sol global, du sol rhizosphérique et du rhizoplan du sol naturel

La composition du cortège minéralogique des sols globaux, rhizosphériques et rhizoplans du sol naturel est similaire (Figure 37). Les diffractogrammes révèlent la présence de minéraux argileux intervenant dans la dynamique du potassium tels que les phyllosilicates comme les micas avec le pic de l'illite autour de 1nm (d001) et à 0,5nm (d002) et un pallier d'interstratifiés situé entre 2,82 et 2,41nm. L'interstratifié à 2,82nm peut être considéré comme de la chlorite/vermiculite ou bien chlorite/smectite. La présence de la kaolinite est observée autour de 0,72 nm (d001) et à 0,359nm (d002). Les minéraux primaires non argileux sont représentés par du quartz à 0,428 nm, et des feldspaths potassiques à 0,335 nm.

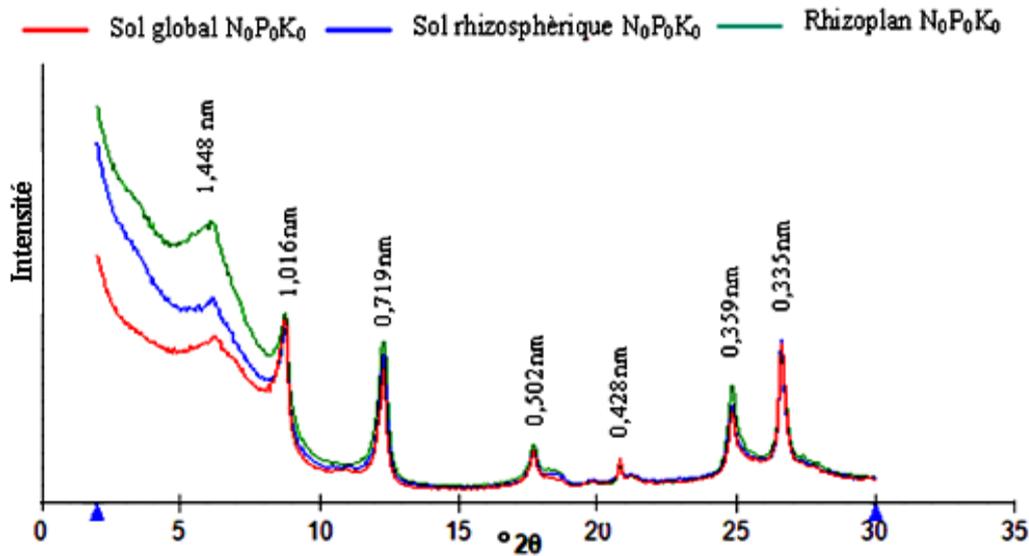


Figure 37 Diffractogrammes des argiles saturées au Sr Cl_2 du sol global, du sol rhizosphérique et du rhizoplan du sol naturel.

2.1.2. Caractéristiques des diffractogrammes décomposés des argiles du sol naturel

Les propriétés minéralogiques issues de la décomposition des diffractogrammes des argiles du sol naturel sont enregistrées au niveau du tableau 20.

Les résultats de la décomposition des diffractogrammes des argiles saturées au strontium des 3 fractions de sol du sol naturel (Tableau 20) indiquent que c'est la phase S/I avec des aires relatives de 64 ; 40,7 et 66% qui prédomine aussi bien dans le sol global que dans le sol rhizosphérique et le rhizoplan. Par contre la phase argileuse chlorite/ vermiculite est très peu représentée (Tableau 20). Une diminution de l'abscisse du centre de gravité de la fraction argileuse du sol rhizosphérique ($C_g=1,23$ nm), comparativement à celle du sol global et celle du rhizoplan ($C_g=1,28$ nm) est observée. L'appauvrissement en potassium interfoliaire serait plus important au niveau du rhizoplan comparativement au sol rhizosphérique. Barré et al. (2007 a) expliquent que les ions potassium anhydres en position interfoliaire provoque la fermeture des feuillets, à l'inverse lorsque les ions potassium sont libérés et donc remplacés par d'autres cations plus hydratés comme le calcium, les feuillets s'écartent. Ces changements de distance interfoliaire des minéraux argileux liés à l'occupation des sites interfoliaires sont observables par diffraction des rayons X. En effet, l'examen du tableau 20 indique que le nombre de feuillets illitiques s'accroît dans le sol rhizosphérique (augmentation de l'aire relative de l'illite et de I/S) mais diminue dans le rhizoplan (diminution de l'aire relative de I et de I/S). En revanche, l'aire relative de la population de S/I dans le rhizoplan augmente comparativement à celle du sol rhizosphérique. Ce qui précède indique une occupation plus

importante par le potassium des sites en position interfoliaire des argiles du sol rhizosphérique. A l'opposé, les argiles du rhizoplan du sol naturel apparaîtraient moins pourvues en potassium en position interfoliaire. Velde et Peck (2002) ont montré que le prélèvement de potassium par des cultures intensives sans fertilisation potassique a provoqué une augmentation de la proportion de la population de S/I dans la fraction argileuse au détriment des phases plus illitiques.

La méthode d'échantillonnage du sol utilisée qui consiste à prélever le sol global, le sol rhizosphérique et le rhizoplan permet de mettre en évidence et de situer des modifications de la phase argileuse à proximité immédiate de la racine. Ces changements suivent un gradient d'éloignement de la racine et se produisent à l'échelle du système racinaire et pour des échelles de temps relativement courtes, celles de la durée du prélèvement du potassium par la racine de l'olivier. La racine de l'olivier qui prélève du potassium appauvrit les argiles du rhizoplan en potassium ce qui entraîne un déplacement de l'abscisse du centre de gravité des argiles saturées au strontium du rhizoplan vers le domaine des petits angles indicateur d'un enrichissement en smectite comparativement au sol rhizosphérique.

Le sol rhizosphérique apparaît plus riche en feuillets d'illite comparativement au sol global et au rhizoplan (Tableau 20). Le potassium apporté par mass flow et /ou libéré par les différents processus de la rhizosphère dans la solution du sol rhizosphérique est fixé en position interfoliaire et contribue à la formation de feuillets d'illite plus nombreux que ceux du sol global et du rhizoplan. Le rhizoplan, lui aussi, reste sous l'influence des processus de la rhizosphère qui induit une concentration plus importante du potassium dans la solution du sol, mais il est aussi soumis au prélèvement de potassium par la racine de l'olivier en période de reprise de la végétation, probablement de façon plus intense que le sol rhizosphérique. A la période de notre échantillonnage qui correspond au début de la reprise de la végétation et pour ce qui concerne les sols non fertilisés, le sol rhizosphérique ne serait pas encore suffisamment atteint par le front d'appauvrissement en potassium des sols du à l'absorption racinaire, ce qui expliquerait l'augmentation de l'abscisse du centre de gravité (en nm) de la fraction argileuse rhizosphérique.

L'analyse de la variance appliquée aux propriétés minéralogiques du sol naturel ne révèle aucune différence significative entre les différents paramètres minéralogiques issus de la décomposition des diffractogrammes des argiles du sol naturel saturées au strontium

(Tableau 20). Les coefficients de variation élevés semblent indiquer une forte hétérogénéité, probablement due au sol, mais aussi au matériel végétal.

La saturation au KCl 1N des argiles du sol global, du sol rhizosphérique et du rhizoplan provoque une diminution significative ($p \leq 0,001$) de l'abscisse du centre de gravité pour les 3 fractions de sols. Ce résultat indique la formation de feuillets d'illite par la fixation de potassium en position interfoliaire. Le gain en centre de gravité ΔCg des argiles du sol global et celui des argiles du rhizoplan est similaire ce qui indiquerait que l'appauvrissement en potassium interfoliaire des argiles du sol naturel à proximité de la racine reste limité. L'analyse de la variance qui compare l'effet de la saturation au Sr et au K montre que l'aire relative de la chlorite/vermiculite a diminué significativement ($p \leq 0,001$) avec la saturation au potassium (de 4,86% pour la saturation au strontium à 1,62% pour la saturation au potassium). C'est la vermiculite qui semble contribuer de façon prépondérante à l'interstratifié chlorite/vermiculite.

Tableau 20 : Caractéristiques des diffractogrammes des argiles saturées au strontium et au potassium du sol naturel

Dose	Fractions de sols	Aire relative de WCI (%)	Aire relative de PCI (%)	Aire relative de I/S (%)	Aire relative de S/I (%)	Aire relative de C/V(%)	Aire relative de I	Cg Sr en°2θ	Cg Sr en nm	Cg K en °2θ	Cg K en nm	ΔCg en %
	G	8,71 ±3,53	1,91 ±10,9	6,86 ±4,77	64,02 ±15,13	5,80 ±3,30	25,6 ±13,5	6,91 ±0,46	1,28 ±0,09	7,4 ±0,08	1,91 ±0,02	7,00 ±5,25
N ₀ P ₀ K ₀	RH	9,62 ±1,48	20,52 ±8,38	10,41 ±8,41	40,70 ±24,65	3,73 ±2,01	30,14 ±9,22	7,15 ±0,33	1,23 ±0,07	7,0 ±0,26	1,18 ±0,04	4,14 ±3,32
	RP	6,59 ±0,61	14,23 ±1,62	8,09 ±5,93	66,03 ±7,29	5,04 ±1,13	20,82 ±1,48	6,87 ±0,09	1,29±0,02	7,4 ±0,05	1,20 ±0,01	6,94 ±1,71
Effet sol		NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Coefficient de variation %		22.91	39.42	65.86	25.72	40.69	31.54	4.03	4.51	1.83	1.88	52.45

$$\Delta Cg \% = Cg K - Cg Sr * 100 / Cg K$$

2.2. Influence de l'apport d'engrais potassiques sur la minéralogie des argiles des différentes fractions de sols

Les caractéristiques des diffractogrammes décomposés sont présentées au niveau du tableau 21. La figure 38 présente les diffractogrammes des sols globaux fertilisés avec les différentes doses d'apport d'engrais. La figure 39 regroupe les diffractogrammes décomposés du sol global, du sol rhizosphérique et du rhizoplan d'oliviers fertilisés avec les différentes doses d'engrais.

2.2.1. Stockage du potassium dans les argiles du sol global

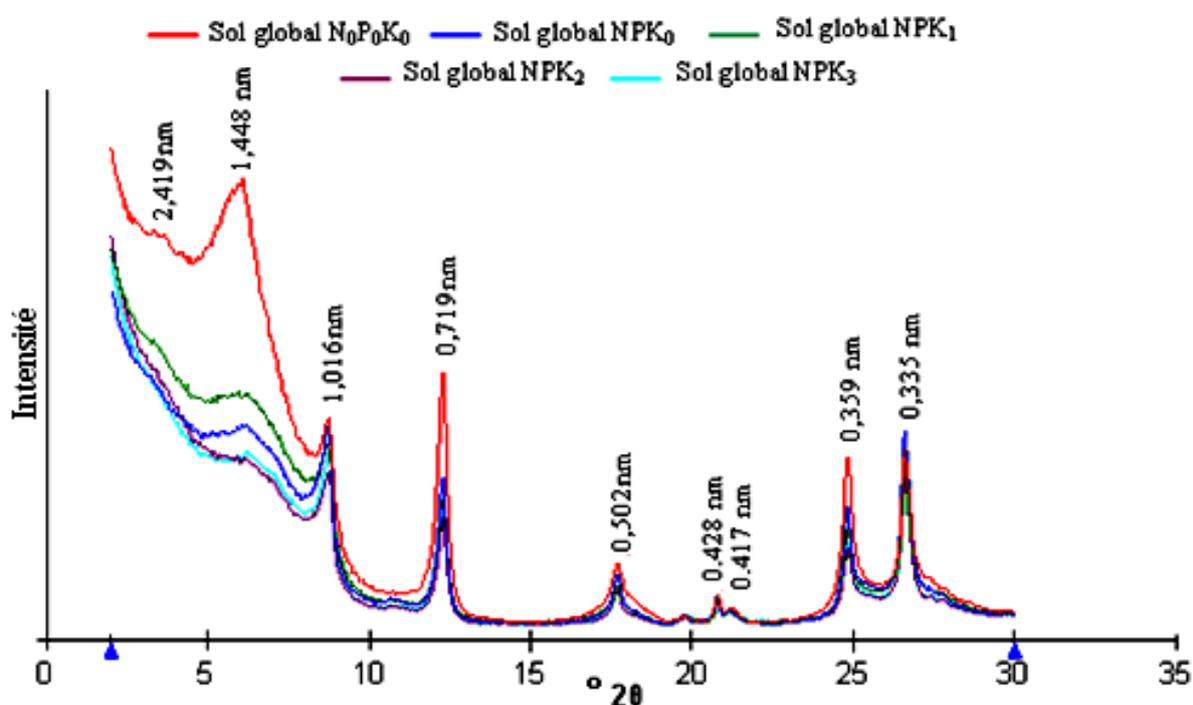


Figure 38 Diffractogrammes des argiles saturées au strontium du sol global naturel ($N_0P_0K_0$) et du sol global fertilisé.

C'est sur les argiles du sol global que l'effet le plus marquant de l'apport d'engrais est observé. En effet l'apport de doses croissantes de potassium associé à celui de l'engrais azoté à 50% d'ammonium induit une diminution de l'intensité des pics des diffractogrammes des argiles des sols globaux fertilisés du domaine compris entre 4 et $7^\circ 2\theta$ comparativement au sol naturel (Figure 38). On peut noter la présence d'un pic autour de $1,48$ nm dans les argiles du sol global naturel, plus intense, avec une diminution de la largeur à mi-hauteur comparativement à celui des argiles des sols fertilisés. L'application de l'engrais azoté (ammonium) et de doses croissantes de potassium a provoqué l'affaissement du pailler

d'interstatifiés compris entre 4 et $7^\circ 2\theta$. Cet effet des engrais est observé dès l'application de l'engrais azoté (figure 38, courbe NPK₀).

L'examen des tableaux 20, 21 et de la figure 39 montre un déplacement des abscisses du centre de gravité des argiles des sols globaux fertilisés vers le domaine des grands angles pour les doses NPK₀ (Cg=1,22nm), NPK₂ (Cg=1,24nm) et NPK₃ (Cg=1,23nm) comparativement à l'abscisse du centre de gravité du sol global de N₀K₀P₀ (Cg=1,28nm) et NPK₁ (Cg=1,30nm), ce qui indiquerait un processus d'illitisation des argiles des sols globaux fertilisés ou de mise en réserve du potassium en position interfoliaire avec les doses NPK₀, NPK₂ et NPK₃. C'est la phase argileuse S/I qui semblerait concernée par les modifications dues à l'apport croissant d'engrais potassiques.

La diminution de l'intensité du pic à 1,48 nm (lorsque les sols globaux sont fertilisés) des argiles du sol naturel serait due à la fixation du potassium, mais aussi à celle de l'ammonium par les argiles des sols. L'ion ammonium et l'ion potassium anhydre qui présentent des rayons ioniques proches ($K^+=1,33 \text{ \AA}$, $NH_4^+=1,43 \text{ \AA}$) sont fixés par les sites en position interfoliaire des argiles avec pour conséquence le rapprochement de ces feuillets. Ainsi, dans les conditions de notre étude, l'ammonium provenant de l'engrais azoté pourrait à l'instar du potassium être fixé par les argiles du sol.

Les abscisses du centre de gravité des argiles des sols globaux fertilisés avec NPK₀ et NPK₃ sont les plus faibles, mais sont aussi assez proches : 1,21nm pour le témoin et 1,23 nm pour les sols fertilisés avec la plus forte dose de potassium.

On aurait pu s'attendre à une augmentation des abscisses du centre de gravité plus importante pour la dose NPK₃, si l'on considère la dose d'engrais potassique apportée. Cette similitude de ces abscisses du centre de gravité pourrait en partie s'expliquer par une fixation plus importante de l'ion ammonium issu de l'engrais azoté lorsqu'il est apporté en absence de potassium, mais aussi probablement par une sélectivité plus importante des argiles de ces sols vis-à-vis de l'ion ammonium. La compétition pour les sites interfoliaires pourrait se faire en faveur de l'ammonium dans le cas de NPK₀ lorsque la solution du sol s'enrichit en NH_4^+ comparativement au potassium.

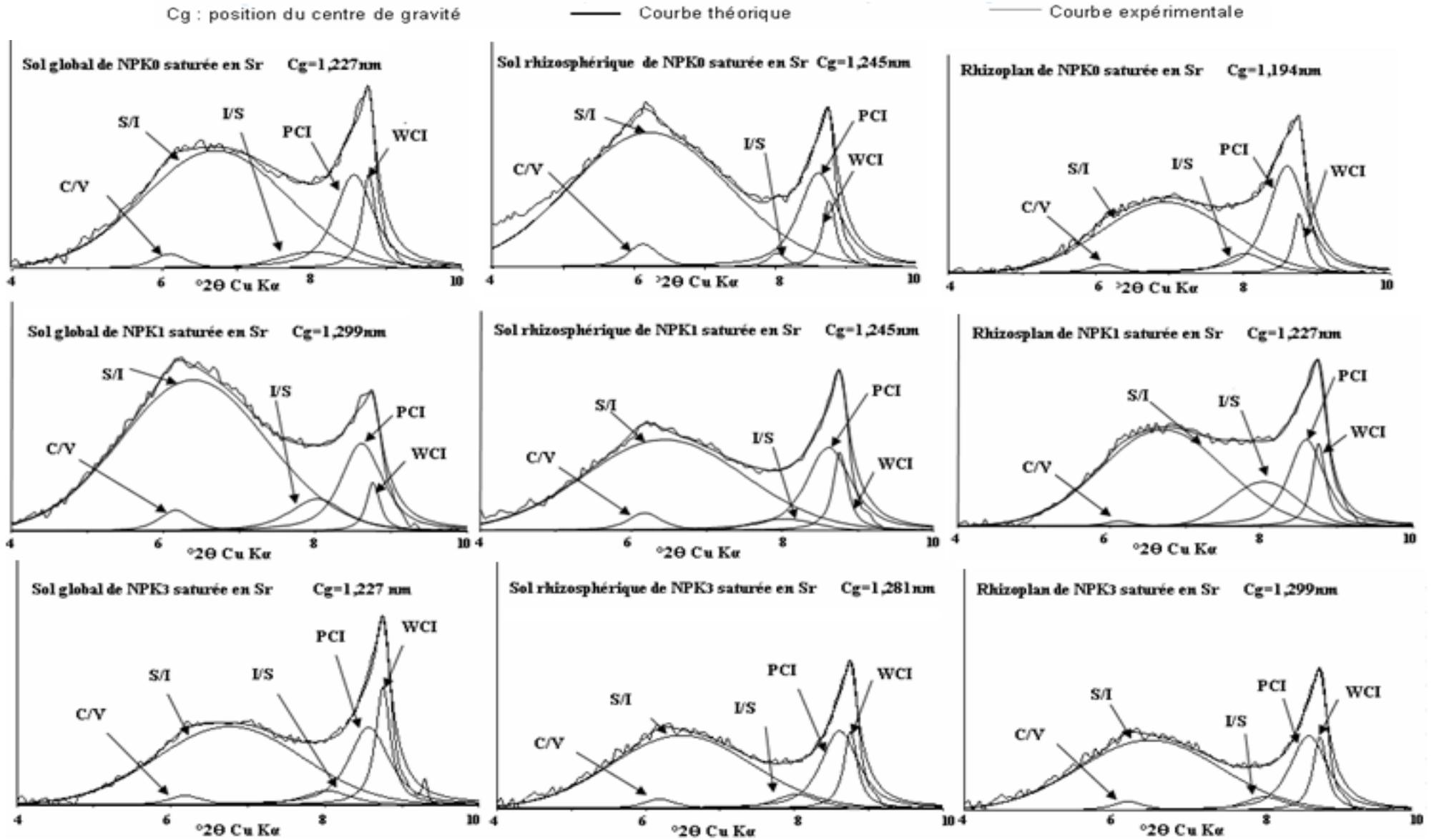


Figure 39 Diffractogrammes décomposés des argiles du sol global, du sol rhizosphérique et du rhizoplan fertilisés (NPK₀, NPK₁, NPK₃)

Trois années après la mise en œuvre du dispositif expérimental, la mesure du potassium biodisponible (K_s , KNH_4^+ et $KHNO_3$) par voie chimique a montré que les sols globaux restaient enrichis en potassium comparativement au sol naturel. Malgré que l'analyse de la variance réalisée sur les paramètres minéralogiques des argiles des sols globaux n'ait pas déterminé un effet dose significatif, la tendance générale est à une augmentation de la mise en réserve du potassium lors de l'application croissante d'engrais potassique. Ces sols montrent une réelle capacité à mettre en réserve le potassium malgré la prédominance de la phase S/I dans la fraction argileuse.

2.2.2. Impact de la fertilisation sur le sol rhizosphérique et le rhizoplan

L'apport croissant d'engrais potassiques n'a pas eu l'effet escompté sur les sols rhizosphériques et les rhizoplans. On aurait pu s'attendre à un accroissement des abscisses des centres de gravité (θ) avec l'augmentation des doses d'application des engrais potassiques à l'instar de ce qui a été observé avec les formes biodisponibles du potassium (chapitre 4) qui augmentaient avec l'accroissement des doses d'engrais potassiques pour l'ensemble des fractions de sol. Au contraire, pour ce qui est de l'impact de l'application de doses croissantes d'engrais potassiques, la tendance générale qui se dégage est à l'augmentation de l'abscisse des centres de gravité du sol rhizosphérique et du rhizoplan avec les apports de doses croissantes d'engrais potassiques comparativement à celles du témoin (Tableau 21).

L'influence de la racine se traduit par un déplacement des abscisses du centre de gravité des argiles du rhizoplan vers les grands angles pour les doses NPK_0 , NPK_1 , NPK_2 comparativement à celui des argiles du sol global (Figure 40.a). Par contre, le gradient inverse soit une augmentation des abscisses du centre de gravité est observée du sol global vers le rhizoplan pour la dose NPK_3 (Figure 40.a) et ceci pour les rhizoplans des quatre arbres échantillonnés.

Tableau 21: Caractéristiques des diffractogrammes des argiles saturées au strontium des sols fertilisés.

		WCI%	PCI%	I/S%	S/I%	C/V%	I%	I+I/S%	Cg Sr en nm
NPK0	G	6,18 ±2,97	13,21 ±4,78	7,44 ±2,45	71,51 ±4,55	1,64 ±0,50	19,39 ±6,00	26,83 ±4,23	1,2 ±0,01
	Rh	7,67 ±2,48	18,58 ±5,33	3,86 ±3,32	66,06 ±8,35	2,61 ±0,44	26,25 ±5,89	30,12 ±9,22	1,26 ±0,06
	RP	6,68 ±2,48	24,60 ±1,29	4,32 ±1,71	60,09 ±1,19	4,29 ±2,03	31,29 ±1,37	35,61 ±1,38	1,22 ±0,07
NPK1	G	5,49 ±4,95	16,58 ±7,43	6,07 ±3,42	68,31 ±1,72	3,52 ±2,49	22,08 ±1,21	28,15 ±1,51	1,30 ±0,11
	Rh	5,68 ±4,82	19,67 ±8,71	5,28 ±3,83	66,37 ±1,74	2,99 ±0,97	25,35 ±1,34	30,64 ±1,67	1,30 ±0,05
	RP	7,24 ±1,73	20,44 ±8,93	10,50 ±3,41	58,77 ±1,06	3,04 ±1,72	27,68 ±1,03	38,18 ±1,03	1,22 ±0,07
NPK2	G	7,56 ±1,86	20,17 ±5,20	3,41 ±1,28	66,66 ±5,64	2,18 ±0,43	27,73 ±5,00	31,15 ±6,04	1,24 ±0,04
	Rh	5,44 ±2,67	11,39 ±8,47	3,28 ±1,58	73,10 ±8,47	2,02 ±0,61	16,83 ±9,74	20,11 ±1,10	1,27 ±0,07
	RP	7,07 ±1,76	20,53 ±3,08	3,99 ±1,15	66,12 ±3,15	2,26 ±0,82	27,60 ±3,36	31,60 ±3,38	1,24 ±0,05
NPK3	G	6,72 ±3,45	14,80 ±4,69	7,61 ±2,83	69,09 ±8,15	1,78 ±0,68	21,52 ±5,51	29,13 ±7,90	1,21 ±0,06
	Rh	5,93 ±3,17	16,14 ±6,16	3,25 ±1,62	72,76 ±1,09	1,90 ±0,42	22,07 ±9,34	25,33 ±1,07	1,29 ±0,09
	RP	5,31 ±0,78	15,21 ±0,76	6,22 ±0,76	70,56 ±0,63	2,69 ±0,39	20,52 ±1,01	26,74 ±0,99	1,31 ±0,06
Effet dose	NS	NS	HS 0,0093	NS	S 0,037	NS	NS	NS	NS
Effet racine	NS	NS	S 0,019	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Effet dose /racine	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Coefficient de variation%		36,97	33,35	46,29	13,2	39,96	31,32	29,99	4,52

Malgré que l'analyse de la variance n'ait pas révélé de différence significative entre les aires relatives de S/I des argiles des rhizoplans comparativement à celles des argiles des sols globaux pour les quatre doses, la tendance générale est à l'accroissement de la population de S/I dans le rhizoplan pour la dose NPK₃ (S/I NPK₀= 60,1%, S/I NPK₁= 58,7%, S/I NPK₂=66,12% et S/I NPK₃= 70,6%). Cet enrichissement en smectite du rhizoplan des oliviers fertilisés avec la dose NPK₃ comparativement à NPK₀, NPK₁ et NPK₂ s'accompagne de la magnitude d'appauvrissement de cette même fraction de sol en forme bio disponible du potassium la plus importante comparativement aux sols fertilisés avec NPK₁ et NPK₂ (Chapitre 4). De plus, un net déplacement de la position de S/I vers le domaine de la smectite est observé pour le rhizoplan de NPK₃ (Figure 40.b), ce qui indiquerait une augmentation du nombre de feuillet de smectite dans la phase argileuse S/I du rhizoplan de NPK₃. Le prélèvement racinaire du potassium par l'olivier pour la dose NPK₃ a impacté significativement les formes bio disponibles du potassium dans le rhizoplan mais aussi la minéralogie de cette fraction de sol.

Toutefois, nous n'avons pu déterminer d'effet statistique significatif de l'application de doses d'engrais potassiques croissantes (Tableau 21) sur les paramètres minéralogiques des argiles des trois fractions de sols. En effet, on aurait pu s'attendre à une augmentation significative de l'aire relative de PCI, de l'illite lorsque ces sols sont soumis à des applications d'engrais potassiques conséquentes. Seule la population d'argile enrichie en illite I/S semblerait plus sensible aux apports d'engrais potassiques et azotés. Un effet dose et un effet sol significatif est révélé pour l'aire relative de la population de I/S (Tableau 21). Ce résultat montre que ce sont les sols qui ont reçu la dose la plus faible en potassium qui présentent l'aire relative IS la plus élevée, ce qui semble en contradiction avec la littérature qui indique plutôt un accroissement de la quantité de I/S avec l'apport d'engrais potassique ou d'amendement organique (Pernes-Debuyser et al., 2003).

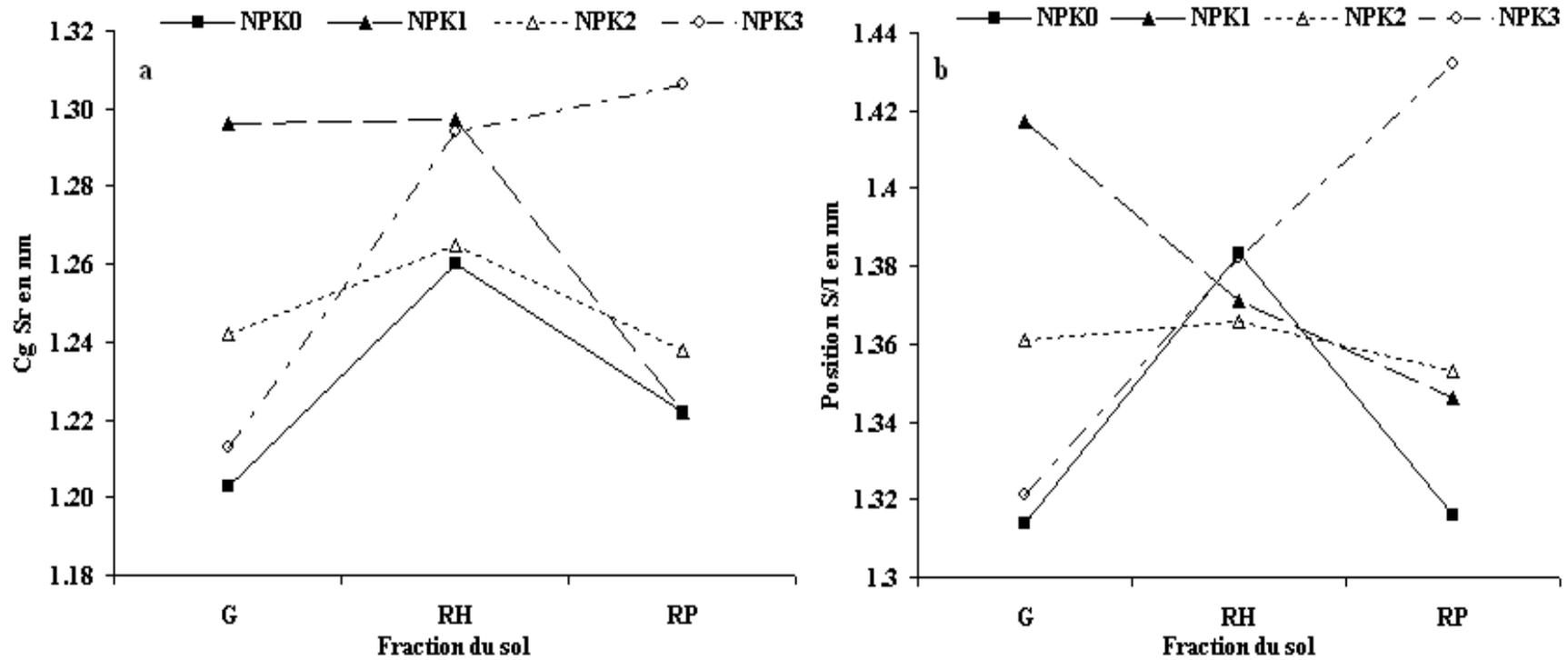


Figure 40 Position de l'abscisse du centre de gravité (a) et de la phase argileuse S/I (b) en fonction des doses pour les 3 fractions de sols.

Les coefficients de variation restent élevés et pourraient masquer l'effet de l'application des engrais potassiques. Ils varient entre 26,42 et 63,65% ce qui indiquerait une forte hétérogénéité des sols et/ou du matériel végétal sur le terrain. En effet, les conditions de pente et la forte alternance de l'olivier (Fernandez et al., 1999) pourraient expliquer cette hétérogénéité. Cette dernière est assez bien représentée par la comparaison des abscisses des centres de gravité des argiles du sol global saturées au strontium avec celles des argiles des rhizoplans (Figure. 41.a). Sur cette figure, les points au dessus de la bissectrice indiquent un processus d'illitisation des argiles du rhizoplan, alors que les points en dessous de la bissectrice, serait plutôt indicateur d'un processus de smectitisation.

L'addition de l'abscisse du centre de gravité des argiles des sols rhizosphériques à celles des argiles du rhizoplan (Figure 41.b), indique la même tendance. Cet impact différent des oliviers sur les argiles de la rhizosphère pourrait être lié à la différence dans l'intensité du prélèvement du potassium par chaque arbre. Une absorption racinaire importante du potassium entrainerait une smectitisation du rhizoplan s'étendant pour certains arbres jusqu'au sol rhizosphérique (point au dessus de la bissectrice (Figure 41.b). A l'inverse, un prélèvement plus faible du potassium par l'olivier conduirait au maintien d'un stock plus important de potassium dans les argiles (points en dessous de la bissectrice).

Par conséquent, les forts coefficients de variation liés à une forte hétérogénéité du sol et/ou du matériel végétal ne nous permettent pas de conclure avec certitude quand à la nature de l'effet de la racine de l'olivier sur les populations d'argiles de sols à statut initial potassique différencié.

Barré et al. (2007a, 2008) ont déterminé l'existence d'un réservoir de potassium facilement quantifiable par la diffraction des rayons X des argiles constitué principalement d'argiles de type 2/1 de type illitique qui se remplirait lorsqu'on apporte du potassium aux argiles (saturation d'échantillons d'argiles avec le potassium au laboratoire) et qui se viderait sous l'effet du prélèvement du potassium par les plantes (appauvrissement des argiles saturées au potassium par *Lolium multiflorum*).

Le dispositif expérimental mise en place a permis de mettre en évidence un stockage du potassium par les argiles des sols globaux pour les doses NPK₂ et NPK₃. Le prélèvement racinaire du potassium par l'olivier n'a eu d'effet sur la minéralogie des argiles en tout cas pour l'année de l'étude et la période d'échantillonnage que pour 50% des oliviers toute dose confondue. Cet effet se traduit par une augmentation des abscisses du centre de gravité (en

nm) dans les rhizoplans de ces oliviers indiquant un nombre moins élevé de feuillet illitique. Pour les 50% restant la minéralogie des argiles du rhizoplan reste proche de celle du sol global.

L'accroissement de la quantité de S/I dans le rhizoplan des oliveraies fertilisées avec la dose NPK₃ serait indicateur d'un prélèvement plus intense du potassium par l'olivier lorsque le statut initial potassique du sol est enrichi. L'absence de données sur le rendement en olive, ne permet pas de statuer sur la pertinence agronomique de trop enrichir le sol en potassium (application de la dose NPK₃). En effet, l'apport d'une dose trop élevée d'engrais potassique (NPK₃) peut conduire à une consommation de luxe du potassium par l'olivier. Cette absorption de potassium par l'olivier au dessus de ses besoins appauvrit la solution du sol en potassium. La libération de potassium à partir des pools biodisponibles intervient pour rééquilibrer la solution du sol en potassium.

Le sol global réagit à des apports croissant d'engrais potassique par un accroissement du Kne (fixation du potassium apporté en position interfoliaire par les argiles). Les argiles du sol global ont répondu par une illitisation. Ces changements de la minéralogie des argiles du sol global sont en accord avec la mesure des formes biodisponible du potassium des sols. Les argiles du sol global sont un bon indicateur d'une pratique culturale comme la fertilisation potassique. Pour ce qui est des argiles de la rhizosphère, la réponse existe mais elle est plus nuancée. Elle consiste en une illitisation ou smectitisation en relation avec l'intensité du prélèvement du potassium par l'olivier. La magnitude de l'appauvrissement en potassium ainsi que son gradient (distance d'éloignement à la racine) dépendrait des besoins ou du prélèvement du potassium par les oliviers. Si les besoins sont élevés, cas d'un arbre en "On", l'intensité de l'appauvrissement sera plus importante que pour un arbre en "Off". De même, dans ce cas de figure, le gradient d'appauvrissement pourrait s'étendre au sol rhizosphérique. Un suivi du potassium foliaire sur plusieurs années serait nécessaire afin de mieux cerner l'alternance des oliviers dans cette parcelle.

La saturation des argiles des sols rhizosphériques et rhizoplans avec du KCl 1N au laboratoire puis analyse par diffraction des rayons X pourrait nous éclairer sur le caractère réversible de l'appauvrissement en potassium à proximité de la racine et par conséquent sur l'existence d'un réservoir qui se vide et se remplit en potassium sous l'effet du prélèvement racinaire et de l'apport d'engrais potassique.

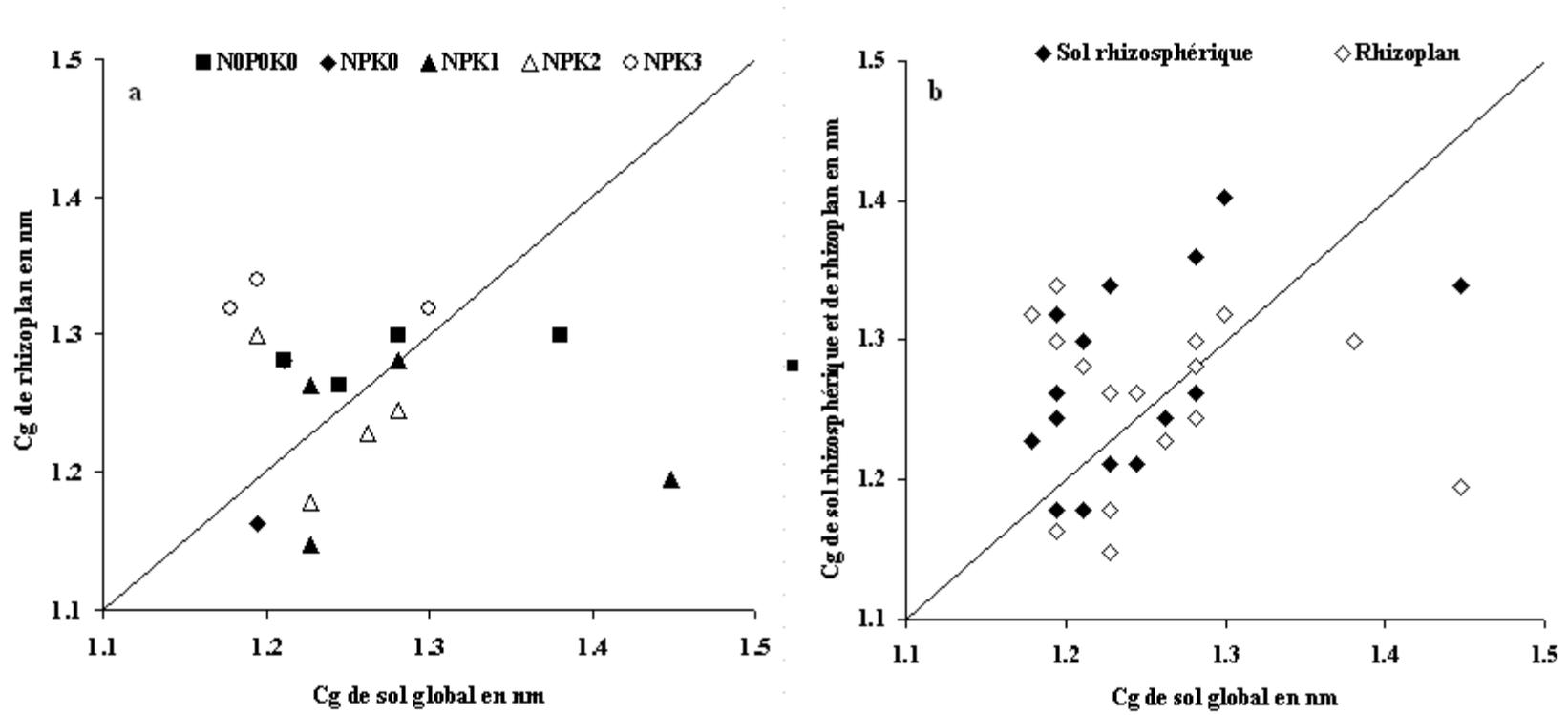


Figure 41 Processus de smectitisation ou d'illitisation dans le rhizoplan (a), dans la rhizosphère (b).

2.3. Diminution du potassium non échangeable fixé dans la rhizosphère

Le potassium apporté par les engrais peut être fixé en position inter foliaire par les argiles du sol. Cette fraction de potassium vient s'ajouter au potassium qui existait déjà en position inter foliaire défini comme potassium natif. Actuellement, il n'y a pas de méthode d'extraction qui permette de distinguer ces deux fractions de potassium, de plus l'extraction au HNO_3 N avec ébullition ne concerne qu'une fraction du potassium en position inter foliaire que celui-ci soit natif ou apporté par les engrais potassiques (Wang et al. 2010). Pour estimer les changements des quantités de Kne, la variation relative du potassium non échangeable (VRKne) est calculé en soustrayant le Kne ($\text{KHNO}_3 - \text{KNH}_4^+$) du sol témoin de celui du sol fertilisé avec du potassium.

La variation de la quantité de potassium fixé en mg/100g de terre par les différentes fractions de sols sont calculés par rapport au témoin NPK₀ et sont présentées dans le tableau 22.

Le calcul a été réalisé pour toutes les fractions de sols comme suit :

$$\text{VRKne (NPK}_1) = \text{Kne ((NPK}_1) - \text{Kne (NPK}_0)$$

$$\text{VRKne (NPK}_2) = \text{Kne ((NPK}_2) - \text{Kne (NPK}_0)$$

$$\text{VRKne (NPK}_3) = \text{Kne ((NPK}_3) - \text{Kne (NPK}_0)$$

Tableau 22 : variation du potassium fixé (en mg/100 g de terre) par le sol global, le sol rhizosphérique et le rhizoplan.

Sols Doses	Sol global	Sol rhizosphérique	Rhizoplan
NPK ₁	20,73	4,95	4,23
NPK ₂	19,6	15,88	8,82
NPK ₃	43,3	15,84	8,93

Les résultats (Tableau 22) montrent une augmentation de la fixation du potassium par les trois fractions de sol avec les apports d'engrais potassiques mais avec un effet plus marqué pour le sol global. En effet, un gradient de diminution de la variation de fixation du potassium du sol global vers la racine est établi pour toutes les doses d'engrais potassiques. Le sol global

NPK₃ présente une variation du potassium non échangeable deux fois plus élevée que celles de NPK₁ et NPK₂. Les sols globaux se caractérisent par un stock plus important du potassium en position interfoliaire comparativement aux argiles de la rhizosphère (sol rhizosphérique et rhizoplan).

L'aire relative de la population chlorite /vermiculite du sol global naturel est de 4,9% (Tableau 20), elle diminue d'environ de moitié pour les sols globaux fertilisés (Tableau 21). De même, une diminution de l'aire relative de I/S qui évolue de 7,6 % au niveau du sol global naturel à 4,35% pour NPK₃ en passant par 3,4% pour NPK₂ (Tableau 21) est observée, ce qui indiquerait que la vermiculite et l'I/S ont fixé du potassium et de l'ammonium provenant des engrais appliqués. Cependant, il faut souligner que les quantités de chlorite/ vermiculite relativement faibles dans ces sols limitent la contribution de cette phase argileuse dans la fixation du potassium. Par contre, le déplacement de la position des pics de la phase S/I du sol global, malgré qu'il soit non significatif, ($p \leq 0,06$, CV=3,76%, Figure 40.b) des argiles des sols globaux vers le domaine de l'illite témoigne de l'implication de cette phase dans le stockage du potassium par les argiles. Pour la phase S/I du sol global, ce déplacement est en moyenne entre la dose NPK₁ (position de S/I=1,42 nm) et NPK₃ (position de S/I=1,32 nm) de l'ordre de 0,1 nm. L'utilisation de la décomposition et la modélisation des pics à déjà permis de mesurer de subtiles changements comme des déplacements de la position du pic de la phase I/S et S/I. Tye et al., (2009) ont mesuré un déplacement maximal du pic de la phase S/I des argiles vers le domaine de l'illite d'un échantillon de sol fertilisé avec du NH₄SO₄ avec un passé cultural de 20 ans de fertilisation potassique de l'ordre de 0,08 nm comparativement au témoin. Ce changement de position indicateur d'un enrichissement en feuillet d'illite de la phase argileuse S/I témoigne de l'enrichissement en potassium interfoliaire des argiles du sol global (Tableau 22), enrichissement déjà mesuré par voie chimique.

La quantité de potassium non échangeable plus faible dans le rhizoplan mais aussi dans le sol rhizosphérique, pourrait être imputée au prélèvement de potassium par l'olivier. Ainsi, cette diminution apparemment plus faible de la fixation du potassium dans le rhizoplan serait surtout indicatrice d'un appauvrissement en potassium non échangeable dans le rhizoplan du à un prélèvement du potassium par l'olivier. Dans une première étape, le sol global après application d'engrais potassiques stocke du potassium en position interfoliaire, avec pour conséquence l'augmentation des abscisses des centres de gravité des sols globaux. Dans une seconde étape, l'olivier à la reprise de la végétation prélève du potassium et appauvrit la fraction argileuse.

Dans les pratiques de fertilisation de l'agriculture conventionnelle le potassium fixé est souvent considéré comme non biodisponible pour la culture en cours. Par conséquent, il est pris en compte dans le calcul la fumure potassique (majoration de la fumure potassique en fonction de pouvoir fixateur des sols vis-à-vis du potassium). De façon générale, la fixation du potassium par les sols est favorisée par une texture riche en argile, par la présence de l'illite et un nombre de cycle humectation-dessiccation relativement important sous climat méditerranéen. Nos résultats montrent d'une part que les argiles du sol global stockent du potassium. D'autre part que cette mise en réserve du potassium par les argiles du sol global ou fixation est réversible pour 50% des rhizoplans des oliviers. En effet, à proximité de la racine, au niveau du rhizoplan, le prélèvement du potassium par l'olivier accroît le nombre de feuillets de smectites pour 50% des oliviers testés. Du potassium non échangeable a été libéré à partir de feuillets d'illites, ce qui indique une réversibilité de la fixation du potassium.

Les quantités de matière organique qui s'accroissent dans les rhizoplans pourraient aussi limiter la fixation du potassium dans cette fraction de sol. La figure 42.a montre une diminution de la fraction de potassium non échangeable (K_{ne}/K_{HNO_3}) avec l'augmentation de carbone du sol dans les rhizoplans. En effet, l'addition de matière organique à un sol limite la quantité de potassium fixée. Bajwa (1989) mesure une diminution de 4,5 à 70,2% avec une moyenne de 27,4% de la quantité de potassium fixé après amendement de matière organique au sol. Plus récemment, Zhang et al., (2009) dans une étude qui a porté sur les facteurs influençant la fixation du potassium au niveau de sols de type différent, montre que c'est l'apport de matière organique qui limite le plus la fixation du potassium pour l'ensemble des sols. Evangelou et al. (1988) suggèrent l'existence d'un blocage physique des sites interfoliaires de fixation des minéraux argileux par des groupements carboxyl (COO^-).

La teneur en matière organique du sol plus importante au niveau des rhizoplans pourrait induire ce type de blocage et restreindre la fixation du potassium à proximité de la racine. A l'opposé, l'accroissement de matière organique sèche dans les rhizoplans augmente la contribution du KNH_4^+ au potassium extractible à l'acide nitrique (Figure 42.b). Cette fixation du potassium plus faible dans le rhizoplan et une teneur en matière organique plus élevée pourrait, aussi contribuer à élever la CEC dans cette fraction de sol comparativement à celle au sol global.

2.4. Relations entre les populations d'argiles et les propriétés chimiques des sols

Trois groupes de corrélations ont été déterminés. Le premier regroupe les corrélations entre les paramètres de la minéralogie issus de la décomposition des diffractogrammes des rayons X et les propriétés chimiques des sols des trois fractions de sol, en tout 60 échantillons de sols.

Les corrélations du second groupe comparent les formes biodisponibles du potassium aux paramètres de la minéralogie dans chaque fraction de sol (sol global, sol rhizosphérique et rhizoplan) soit 20 échantillons. Les corrélations entre les paramètres minéralogiques du sol global, du sol rhizosphérique et du rhizoplan constituent le dernier groupe.

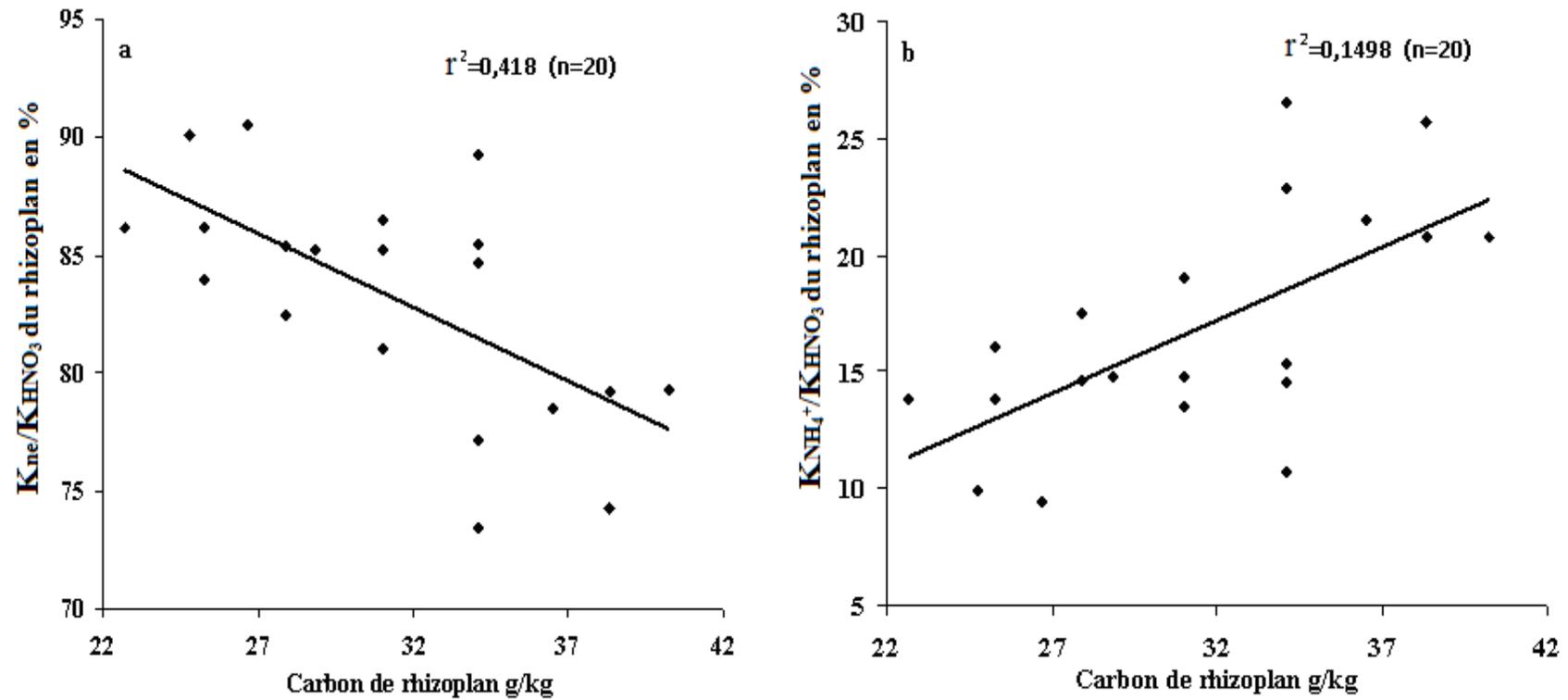


Figure 42 : Diminution de la fraction de potassium non échangeable (a), augmentation de la fraction de KNH_4^+ (b) avec l'accroissement de la teneur en carbone du sol dans les rhizoplans

2.5. Biodisponibilité du potassium en relation avec les populations d'argiles

L'aire relative de S/I est significativement et positivement corrélée avec le potassium soluble ($r = 0,28^*$, $n = 60$), le rapport KS/KNH_4^+ ($r = 0,26^*$, $n = 60$), le rapport $KNH_4^+/KHN0_3$ ($r = 0,30^*$, $n=60$). Le rapport $KNH_4^+/KHN0_3$ indique la capacité du sol à libérer du KNH_4^+ à partir du pool de potassium extractible à l'acide nitrique N. Cette capacité s'élèverait avec la quantité de S/I dans la fraction argileuse du sol. Le rapport K_S/KNH_4^+ (sans être une mesure du pouvoir tampon de ces sols vis-à-vis du potassium) pourrait indiquer la capacité de ces sols fertilisés avec des doses croissantes de potassium à libérer du potassium immédiatement disponible (KS) pour les cultures à partir du pool assimilable.

La phase argileuse S/I du sol contribue à une meilleure alimentation en potassium de la solution du sol. Les smectites se caractérisent par une plus forte proportion de sites planaires libérant plus facilement le potassium adsorbé comparativement aux sites interfoliaires. Par contre, le KS et le KNH_4^+ et le Kne sont significativement et négativement corrélés à la population d'argile enrichie en illite (I/S) ($r=-0,27^*$, $r=-0,26^*$, $r= -0,28^*$, $n=60$). La population d'argile enrichie en illite (I/S) ne semble pas intervenir dans le réapprovisionnement en potassium de la solution du sol. La fraction de potassium non échangeable considérée comme biodisponible ne serait pas extrait par l'acide nitrique 1N à partir de la phase argileuse I/S.

Par contre, l'augmentation positive mais non significative ($r = 0,20$, $n = 60$) du potassium non échangeable avec la phase argileuse S/I, suggère que cette phase pourrait intervenir dans la mise en réserve du potassium non échangeable au niveau de ses feuillettes d'illites. Ces relations mettent en lumière une partition du réservoir en potassium dans ces sols. Une fraction du réservoir en potassium représentée par la phase argileuse S/I serait plus accessible pour les oliviers que le potassium stocké dans le réservoir constitué par la phase argileuse I/S.

Cependant, au stade de notre étude, nous ne pouvons conclure sur la biodisponibilité du réservoir en potassium représentée par la phase argileuse I/S, sur le long terme. La réduction de la concentration du potassium en solution consécutive à l'épuisement du potassium à partir du réservoir S/I dû à l'exportation du potassium hors parcelle par les récoltes d'olives, pourrait mobiliser une fraction du potassium du réservoir constitué par la population I/S.

2.5.1. Relations entre les formes biodisponibles du potassium et la minéralogie des argiles du sol rhizosphérique

Les formes de potassium biodisponible du sol global et du rhizoplan ne présentent pas de relations significatives avec les propriétés minéralogiques de ces deux fractions de sols. Cette absence de corrélations s'expliquerait, concernant le sol global par un apport important de potassium en localisé qui maintiendrait des concentrations élevées en potassium dans le sol qui ne seraient plus en relation avec les différentes populations d'argiles du sol global. Pour ce qui est du rhizoplan, il semblerait que la matière organique joue un rôle prépondérant dans la dynamique du potassium, en effet le potassium biodisponible KS et KNH_4^+ sont significativement et positivement corrélés avec la matière organique de cette fraction de sol ($r = 0,70^{**}$, $r = 0,59^*$, $n = 20$), ces relations n'existent ni dans le sol rhizosphérique ni dans le sol global. Le potassium biodisponible du rhizoplan serait préférentiellement retenu par des sites d'échanges situés sur la matière organique. C'est au niveau du sol rhizosphérique que les corrélations entre les caractéristiques minéralogiques des argiles et les différentes formes de potassium sont les plus nombreuses (Tableau 23).

La phase argileuse rhizosphérique enrichie en smectite (S/I) se distingue par des corrélations significatives et positives avec l'ensemble des formes biodisponibles (Tableau 23), à l'inverse les corrélations sont significatives mais deviennent négatives avec la fraction argileuse rhizosphérique illitique et enrichie en illite (I/S, $I\%+I/S\%$,) (Tableau 23). Comme nous l'avons vu précédemment, c'est la phase argileuse S/I qui intervient de manière prépondérante dans la biodisponibilité du potassium. Il semblerait que le sol rhizosphérique soit une zone de sol tampon où serait limité à la fois l'effet de l'application d'engrais potassique en dose élevée en raison du choix du mode d'apport (localisé) et celui de la racine (prélèvement racinaire du potassium).

2.5.2. Relation entre les populations d'argile du sol global et celle du rhizoplan

L'apport d'engrais potassique à fortes doses dans le sol global et l'effet de la racine dans le rhizoplan auraient pour conséquence de limiter les relations entre la minéralogie des sols globaux et rhizoplan. En effet, nous n'avons établi aucune corrélation entre les propriétés minéralogiques du sol global et celles du rhizoplan.

Tableau 23 : relations entre les paramètres de la minéralogie et les caractéristiques potassiques des sols rhizosphériques (n=20)

	% WCI	% PCI	% I/S	% S/I	% C/V	I %	I%+I/S%	Cg	CV+SI	CV+SI+IS
KNH4 ⁺	-0,44	-0,42	-0,39	0,52 *	-0,57 **	-0,46 *	-0,49 *	-0,32	0,50 *	0,42
KS	-0,46 *	-0,47 *	-0,41	0,53 *	-0,53 *	-0,50 *	-0,52 *	-0,38	0,52 *	0,44
Kne	-0,53 *	-0,35	-0,50 *	0,50 *	-0,63 **	-0,44	-0,51 *	-0,24	0,47 *	0,37
KHNO3	-0,50 *	-0,33	-0,45	0,49 *	-0,60 **	-0,41	-0,47 *	-0,26	0,47 *	0,37
KS/KNH4 ⁺	-0,50 *	-0,46 *	-0,49 *	0,64 **	-0,48 *	-0,51 *	-0,56 *	-0,34	0,63 **	0,54 *
KNH4 ⁺ /KHNO ₃	-0,33	-0,41	-0,30	0,51 *	-0,53 *	-0,41	-0,42	-0,26	0,49 *	0,44
Kne/KHNO3	0,27	0,14	0,18	-0,31	0,35	0,19	0,21	0,14	-0,30	-0,27

2. Conclusion

La fertilisation potassique mais aussi l'apport d'engrais azoté en mode localisé modifie les propriétés minéralogiques des argiles des sols globaux. La réponse est une fixation du potassium mais aussi de l'ammonium par les argiles du sol global démontrée par une illitisation croissante des argiles indiquant une mise en réserve du potassium qui persiste 3 années après la mise en place du dispositif expérimental. Les sols globaux stockent le potassium apporté par l'engrais potassique. Par contre les résultats obtenus sur les argiles de la rhizosphère ne sont pas aussi tranchés. En effet, alors que la mesure par voie chimique des pools biodisponibles du potassium montre une diminution de la teneur de l'ensemble des formes biodisponibles du potassium à proximité de la racine, il n'en est pas de même pour la minéralogie des argiles. La réduction de la teneur en Kne dans les rhizoplans ne semble être détectée (par une smectitisation et/ou vermiculisation des argiles) que pour 50 % des arbres testés. Par contre, pour les 50 % restant, il s'agit plutôt d'une illitisation des argiles du rhizoplan. L'une des explications retenue serait que l'évolution des argiles de la rhizosphère pourraient refléter l'intensité du prélèvement racinaire du potassium, lui-même déterminé par le statut physiologique des oliviers (arbre en On ou Off) et le statut potassique initial du sol global. Ces variations seraient liées à une sollicitation plus ou moins importante du réservoir en potassium par les racines de l'olivier. Toutefois, en raison des coefficients de variation élevés, d'autres facteurs non pris en compte dans l'étude pourraient intervenir sur la minéralogie des argiles.

Parmi les cinq phases d'argiles des diffractogrammes d'argiles décomposés, la phase S/I est celle qui est la plus impliquée dans la dynamique des formes biodisponibles du potassium mesurées dans les sols. Elle intervient dans l'alimentation en potassium de la solution du sol et dans l'adsorption du potassium assimilable. Ces relations se précisent dans le sol rhizosphérique qui se présente comme une zone tampon où est atténué à la fois l'effet d'applications massives d'engrais potassiques (application localisée) et celui du prélèvement racinaire du potassium par l'olivier.

F- Distribution du potassium dans la rhizosphère en relation avec l'espèce : l'olivier (*Olea europea* L.) et le figuier (*Ficus carica* L.)

Introduction

L'olivier et le figuier sont deux espèces fruitières rustiques, parmi les plus cultivées en Kabylie, Nord de l'Algérie. Ces arbres sont souvent cultivés sur des sols marginaux à la fertilité limitée. L'utilisation par la plante des nutriments dépend fortement des conditions physiques, chimiques et biologiques du sol à proximité immédiate des racines (Darrah et al, 2006 ; Romheld et Newmann, 2006). La disponibilité des éléments nutritifs dans cette zone est étroitement liée à la structure et aux fonctions de la racine et des systèmes racinaires (Gobran et al. 1996 ; Hinsinger et Gregory, 1998). La magnitude des changements dans la rhizosphère dépend de l'activité des racines et des microorganismes qui lui sont associés lesquels apparaissent comme reliés à l'espèce d'arbre, à son génotype et à la fertilité des sols (Chen et al., 2006). Augusto et al., (2002), Chen et al., (2002); Chiu et al.,(2002); Calvaruso et al., (2011) ; Dinesh et al., (2010) ont démontré que des espèces d'arbres pouvaient différer dans leur influence sur les propriétés des sols et des communautés biologiques créant ainsi un environnement de sol distinct. Grayston et al., (1996) soulignent que la quantité et la qualité des rhizodépôts sont sous le contrôle génétique des plantes. Chen et al., (2001) notent que la concentration en potassium de la rhizosphère de trois essences forestières dépend de l'espèce. Smith, (1976) mesurent une variation des teneurs en potassium des exsudats rhizosphériques de trois essences forestières. Ainsi la racine de différentes espèces modifie le sol à sa proximité immédiate par la nature et la quantité des rhizodépôts. De plus, l'aptitude des plantes à utiliser les éléments nutritifs peu disponibles à proximité des racines diffèrent aussi bien au niveau de l'espèce que du génotype (Gahonnia et al. 1992 ; Zhang et Cao, 1992). Ainsi, la racine affecte considérablement et différemment en fonction de l'espèce les propriétés des sols à sa proximité immédiate. Cette capacité des espèces à modifier la biodisponibilité des éléments nutritifs dans la rhizosphère peut devenir une caractéristique capitale dans la sélection d'espèces à implanter sur des sols déficients. Ainsi que le soulignent Calvaruso et al., (2011) de nouvelles études sont nécessaires afin de quantifier l'influence de différentes espèces d'arbres sur la biodisponibilité des nutriments à travers les processus de la rhizosphère.

L'olivier améliore sa rhizosphère (chapitre 3), en y diminuant le pH, en y accroissant la teneur en matière organique et les formes de potassium biodisponible. Il est généralement

admis que le figuier à l'instar de l'olivier est une espèce peu exigeante quant à la fertilité des sols. Cette capacité du figuier à croître sur des sols à fertilité limitée pourrait trouver son explication dans son aptitude, dans une certaine mesure, à améliorer sa rhizosphère.

Peu d'études à notre connaissance se sont intéressées à l'impact des racines de l'olivier et du figuier sur des sols peu remaniés. Le principal objectif de cette étude est de déterminer et de comparer les propriétés chimiques du sol rhizosphérique et du sol global de deux espèces fruitières méditerranéennes : l'olivier et du figuier.

1. Matériels et méthodes.

1.1. Sites étudiés et échantillonnage des sols

Les sites étudiés (Tableau 24) ont été sélectionnés sur la base du type de sol, du substrat géologique, de l'espèce végétale (olivier et figuier) et de la contiguïté des vergers. L'échantillonnage des sols a porté sur quatre vergers d'oliviers et de figuiers de la région de Tizi-Ouzou (Guendoul, Tizi Rached, Nezla) et un de la région de Bouira. Les prélèvements de sol sont effectués au cours du repos hivernal (décembre). Nous avons procédé au prélèvement de deux fractions de sol : le sol global et le sol rhizosphérique

1.2. Quantification de la biomasse racinaire

Pour compléter notre étude, nous avons quantifié la biomasse racinaire des deux espèces. Trois cylindres de volume de 250 ml sont introduits dans les horizons des sols de 3 oliviers et de 3 figuiers qui présentent la plus importante prolifération de racines fines. Ces profondeurs correspondent pour chaque espèce approximativement aux limites des horizons homogènes de prospection racinaire. Il s'agit des horizons 0-12cm, 12-30cm et 30-45cm pour l'olivier, 0-15cm, 15-25cm et 25-40 cm pour le figuier. La terre et les racines contenues dans les cylindres sont séparées. Un échantillon moyen composite de la biomasse racinaire des 3 arbres par station est constitué. Les racines après avoir été lavées sont séchées dans une étuve à 60° et ceci jusqu'à constance du poids. Les résultats sont exprimés en gramme de matière sèche de racines par dm³ de sol.

1.3. Analyse des sols

La fraction fine des sols est soumise à une caractérisation physico- chimique comportant la granulométrie, le pH, le calcaire total, le carbone organique du sol et la capacité d'échange cationique. Les formes bio disponibles du potassium ; le potassium soluble, le potassium assimilable extrait à l'acétate d'ammonium, le potassium extrait à l'acide nitrique sont également mesurées.

1.4. Analyses statistiques

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.

2. Résultats et discussion

2.1 .Sols globaux

Le sol global sous oliviers et figuiers des 4 sites étudiés présente une certaine homogénéité. La texture, le taux d'argile, le calcaire total, le pH, la teneur en carbone du sol, la CEC, le potassium assimilable extrait à l'acétate d'ammonium, le potassium extractible à l'acide nitrique (Tableau 24) ne montrent pas de différences importantes. Binkley (1995) indique que les principaux paramètres permettant la comparaison des sols sont : l'homogénéité des sols et du matériel parental, la proximité des différentes parcelles, un microclimat identique (température, humidité, précipitations), une exposition et une pente similaire. Les caractéristiques des sites étudiés (Tableau 24) permettent la comparaison de l'effet de la racine des deux espèces olivier et figuier sur un même sol. Par contre, certaines propriétés chimiques du sol varient d'une station à une autre.

Pour les oliveraies, les taux d'argiles sont compris entre 13,68 et 23,4 %, la teneur en carbone du sol entre 4 et 14 g.kg⁻¹, la CEC entre 9,36 et 14,40 cmolc. kg⁻¹, le KNH₄⁺ entre 21,73 et 26,7 mg/100g de terre, le KHNO₃⁺ entre 97,04 et 59,08 mg/100g de terre, le potassium non échangeable entre 32,38 et 75,31 mg/100g de terre.

Concernant les figueraies, le taux d'argiles est compris entre 13,75 et 27 %, la teneur en carbone du sol entre 3 et 13,3 g. kg⁻¹, la CEC entre 9,25 et 15,58 Cmolc. kg⁻¹, le KNH₄⁺ entre 20,83 et 30,52 mg/100 gde terre, le KHNO₃⁺ entre 47,22 et 73,14 mg/100g de terre, le potassium non échangeable entre 16,7 et 51,48 mg/100g de terre.

Ces variations des propriétés des sols entre les sites sélectionnés permettent de déterminer un statut initial des sols contrasté pour les propriétés physiques et chimiques des sols.

2.2. Biomasse racinaire

La biomasse racinaire est la plus élevée dans les horizons supérieurs des sols pour les deux espèces. Elle est en moyenne de $12,5 \text{ g.dm}^{-3}$ pour l'olivier (0-12cm) et de $3,94 \text{ g.dm}^{-3}$ (0-15cm) pour le figuier. La biomasse racinaire chute à 5 g.dm^{-3} entre 10 et 25 cm pour l'olivier et $1,7 \text{ g.dm}^{-3}$ pour le figuier. L'horizon le plus profond présente très peu de racines. C'est *Olea europea* L. qui présente la plus forte biomasse racinaire dans les deux horizons supérieurs de prospection racinaire comparativement à *Ficus carica* L. Nait Kaci et al.(2010) qui ont étudié les systèmes racinaires de ces deux espèces fruitières dans les mêmes stations ont montré que l'ensemble des racines des arbres des deux espèces sont mycorrhysées, avec une prépondérance de racines fines pour l'olivier comparativement au figuier.

Tableau 24 : données de bases sur les sites étudiés

Sites	Coord. Alt. (m)	Espèces	Matériel parental	Pente	Type de sol (WRB 2006)	Texture	CaCO ₃ %	Argile %	C g.kg ⁻¹	pHeau	CEC cmolc.kg ⁻¹	KNH ₄ mg/100g	KHNO ₃ mg/100g
Bouira	36°23'43.19 "3° 36 25' 22 92" E 373	<i>Olea europea</i> L. <i>Ficus carrica</i> L.	Alluvions anciennes	0%	Cambisol (calcaric)	LS	11,8 15,4	23,40 26,88	7,1 8,9	7,41 7,41	10,03 11,2	21,73 27,18	97,04 73,14
	Guendo ul	36°44' 20.63"N 4°13' 05.91" E 546	<i>Olea europea</i> L. <i>Ficus carrica</i> L.	calcaires	10%	Cambisol (calcaric)	Lpurs	25 26,7	13,68 13,75	12,9 12,5	7,62 7,46	9,36 9,25	26,7 28,53
Nezla		36°47'04,42"N 13°40'00"E 492	<i>Olea europea</i> L. <i>Ficus carrica</i> L.	alluvions anciennes	5%	Cambisol (eutric)	LS	2,4 3,7	16,53 20,37	4,0 3,3	7,00 7,44	10,20 11,10	26,13 30,35
	Tizi- Rached	36°41'20.87"N 4°07'43.43"E 240	<i>Olea europea</i> L. <i>Ficus carrica</i> L.	Calcaires	5%	Cambisol (calcaric)	LAS	11,1 8,9	21,90 26,9	13,9 13,3	7,65 7,57	14,4 15,58	23,65 35,35

2.3. Changement des propriétés du sol dans la rhizosphère

Les résultats des principales propriétés chimiques et potassiques des sols globaux et rhizosphériques des 4 oliveraies et figueraies étudiées sont présentés dans le tableau 25.

Les sols globaux et les sols rhizosphériques présentent une même texture pour chacun des sites étudiés. Les taux d'argile sont significativement ($p \leq 0,05$) plus élevés dans la rhizosphère de l'olivier. La rhizosphère de l'olivier s'enrichit en moyenne de 10,2 %. Par contre, pour le figuier malgré une augmentation de 8,83% de la fraction argileuse dans la rhizosphère celle-ci n'est pas significative ($p = 0,08$) comparativement au sol global. Cette concentration d'argiles à proximité des racines a déjà été observée par d'autres auteurs (Chiu et al. 2002).

Les racines des plantes jouent un rôle important dans le développement d'agrégats dans la rhizosphère (Watteau et al., 2006) par la libération de composés organiques (Gregory, 2006) 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), favorisant ainsi l'adhésion des particules argileuses. De plus, les racines par les fortes pressions qu'elles exercent, peuvent favoriser aussi la micro division des particules (Callot et al., 1982) ce qui expliquerait l'enrichissement en argile du sol rhizosphérique.

En général le pH des sols rhizosphériques est neutre. Le pH diminue significativement ($p \leq 0,017$ pour l'olivier et $p \leq 0,012$ pour le figuier) dans la rhizosphère des deux espèces (Figure 43.a). Toutefois, la diminution est limitée, et reste comparable pour les deux espèces, en moyenne de 1% pour l'olivier et 0,63% pour le figuier. Divers auteurs (Ae et al., 1991; Augusto et al., 2002 ; Ma et al., 2009 ; Dinesh et al., 2010) ont mesuré une acidification importante dans la rhizosphère de différentes espèces d'arbres et dans diverses conditions. Cette diminution de pH a été attribuée à la libération de H^+ par la respiration de la racine et des microorganismes des sols (Hinsinger et al. 2006) et à la libération d'exsudats acides dans la rhizosphère (Grayston et al., 1996; Hoffland et al., 1989 ; John et Darrah., 1994 ; Hinsinger et al., 2009).

Les pH comparables dans la rhizosphère et le sol global sont dus au fort pouvoir tampon exercé par les carbonates de calcium dans ces sols (Hinsinger et al., 2003). Schubert et al., (1999) ont prouvé que les racines induisent des changements de pH dépendant du

pouvoir tampon du sol. Plus le pouvoir tampon du sol augmente plus la variation de pH diminue. Ström et al., (2005), observent une faible, voire une absence de chute de pH dans les sols calcaires à proximité de la racine des plantes. Dans les sols calcaires, l'exsudation élevée d'acides organiques ne mène pas nécessairement à un abaissement mesurable du pH dans le sol rhizosphérique (Ström, 1997).

Une augmentation significative ($p \leq 0,03$ pour l'olivier et $p \leq 0,001$ pour le figuier) de la valeur moyenne des teneurs en carbone du sol est observée dans le sol rhizosphérique (Figure 43.b) pour les deux espèces. Divers auteurs, dans des conditions de climat et de sol diverses, et pour différentes espèces de plantes ont obtenu des résultats similaires (Gobran et al., 1998 ; Chen et al., 2006; Dinesh et al., 2010, Calvaruso et al., 2011). Ces nombreux résidus retrouvés dans la rhizosphère sont colonisés par des microorganismes plus nombreux dans la rhizosphère (Bonkowski et al. 2000) ce qui explique aussi le contenu en carbone qui augmente dans la rhizosphère. L'ensemble des racines des deux espèces était infesté par des mycorrhises. Leyval et Berthelin (1993) ont montré que des arbres mycorhizés exsudaient plus de carbone que les arbres non mycorhizes. De telles accumulations de carbone dans la rhizosphère d'espèces méditerranéennes sont importantes pour des sols méditerranéens connus pour leur déficience en matière organique et en certains éléments minéraux tels que le phosphore et les micronutriments.

Les sols étudiés ont une capacité d'échange cationique (CEC) moyenne. Les valeurs de la C.E.C. des sols rhizosphériques sont supérieures à celle des sols globaux (figure 43c) pour les deux espèces. La CEC dans la rhizosphère de l'olivier a augmenté en moyenne de 10,64 % et dans celle du figuier de 8,75% comparativement à celles des sols globaux. Les CEC plus élevées dans la rhizosphère s'expliquent par les taux de matière organique et d'argile plus importants (Turpault et al., 2005), ce qui fournit plus de sites d'échange cationique disponibles pour l'échange (Chiu et al., 2002).

Une autre source d'augmentation de la CEC serait, des quantités élevées de matière organique non humiques (Turpault et al. 2007). Cependant cette différence de la CEC entre le sol global et rhizosphérique des deux espèces reste non significative ($p=0,07$ pour l'olivier et $p=0,16$ pour le figuier).

Tableau 25 : quelques propriétés du sol global et du sol rhizosphérique des vergers étudiés

Station	Espèce	Sol	pH	C (g/100g)	CEC (cmol/kg)	Ks (mg/100g)	KNH ₄ (mg/100g)	KHNO ₃ (mg/100g)	Kne (mg/100g)	KNH ₄ /CEC
Bouira	Olivier	G	7,41	7,13	10,03	2,27	21,73	97,04	75,31	5,555
		Rh	7,37	13,27	11,28	2,46	27,18	123,07	95,89	6,206
	Figuier	G	7,41	7,93	11,20	2,43	21,67	73,14	51,47	4,96
		Rh	7,39	15,50	11,30	3,37	28,07	77,306	49,24	6,369
Guenboul	Olivier	G	7,62	13,00	9,36	3,75	26,83	59,08	32,25	7,355
		Rh	7,51	16,35	10,54	3,93	28,53	62,77	34,24	6,941
	Figuier	G	7,46	10,86	9,25	1,72	29,16	67,647	38,49	8,118
		Rh	7,427	14,76	11,50	2,62	32,14	76,263	44,12	7,208
Tizi-Rached	Olivier	G	7,65	13,87	14,40	2,63	23,66	66,98	43,32	4,22
		Rh	7,55	19,60	16,04	3,14	35,35	69,36	34,01	5,648
	Figuier	G	7,53	14,70	15,58	2,58	30,52	48,22	17,70	5,036
		Rh	7,57	18,60	17,04	3,41	35,61	51,00	15,39	5,357
Nezla	Olivier	G	7,00	7,03	10,20	1,65	26,13	80,08	53,95	6,575
		Rh	6,93	9,60	11,40	2,22	30,35	87,12	56,77	6,828
	Figuier	G	7,44	14,70	11,10	0,99	20,83	64,07	43,24	4,81
		Rh	7,37	17,90	11,8	1,26	21,573	71,357	49,78	4,693

F- Distribution du potassium dans la rhizosphère en relation avec l'espèce : l'olivier (*Olea europea* L.) et le figuier (*Ficus carica* L.)

Il est intéressant de noter que ces résultats ont déjà été signalés par Gobran et Clegg (1996) dans des conditions éco pédoclimatique tout a fait différentes et viennent appuyer le modèle conceptuel proposé par ces auteurs de la biodisponibilité des nutriments dans un système sol minéral-rhizosphère d'un peuplement d'épinette de Norvège (épicéa) implanté sur un podzol peu fertile du sud-ouest de la Suède

F- Distribution du potassium dans la rhizosphère en relation avec l'espèce : l'olivier (*Olea europea* L.) et le figuier (*Ficus carica* L.)

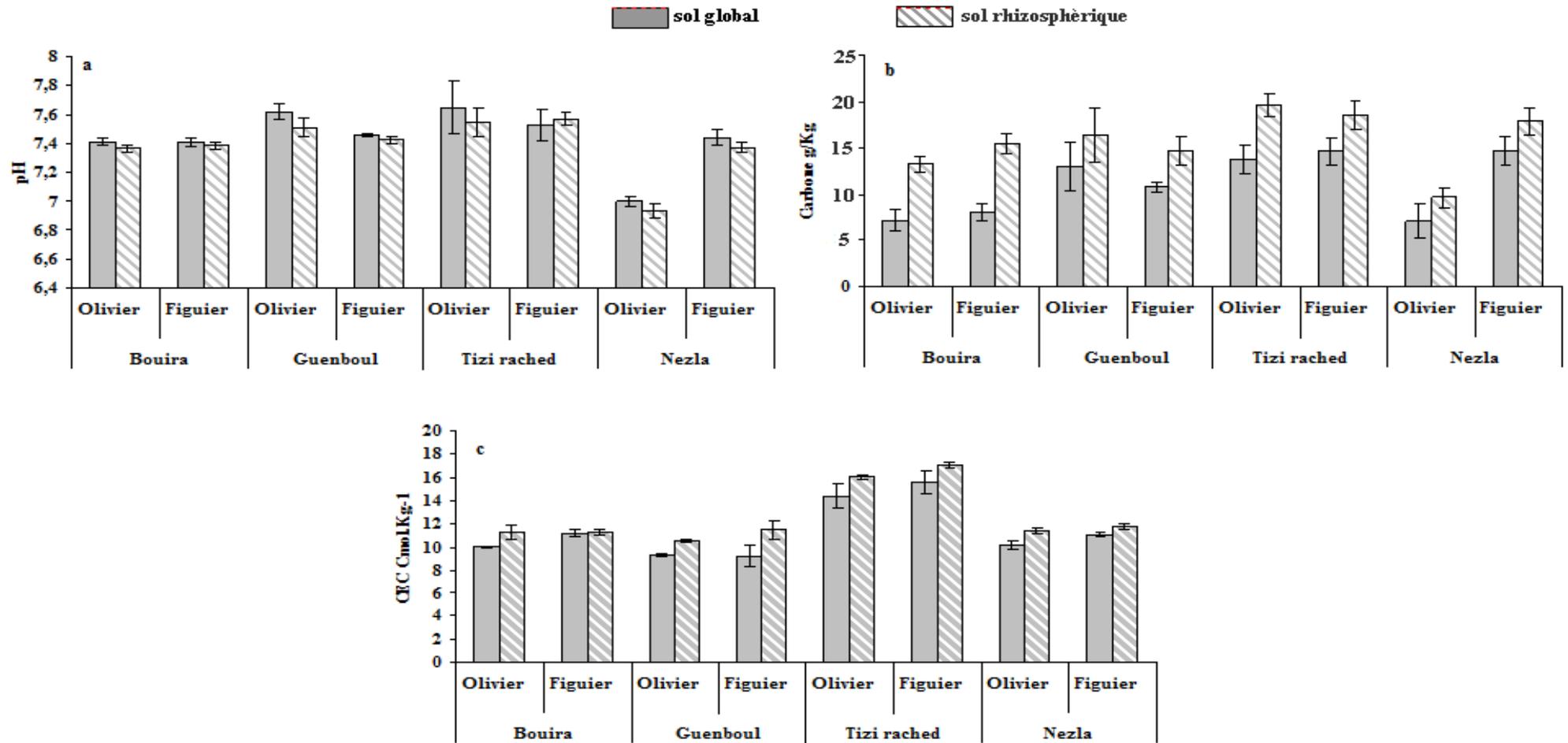


Figure 43 Caractéristiques chimiques du global et sol rhizosphérique de l'olivier et du figuier .pH (a), carbone du sol (b) et la CEC(c). Les barres d'erreur représentent les erreurs standards.

2.4. Effet de la rhizosphère sur la distribution du potassium

Les teneurs en potassium immédiatement disponible (K_s) fluctuent de 2,2 à 3,93 mg/100g de terre et de 1,26 à 3,41 mg/100g de terre dans les sols rhizosphériques de l'olivier et du figuier respectivement (Tableau 25). Les teneurs en KNH_4^+ fluctuent de 27,18 à 30,35 mg/100g de terre et de 21,57 à 35,61 mg/100g de terre dans les sols rhizosphériques de l'olivier et du figuier respectivement (Tableau 25). Les teneurs en potassium extractible à l'acide nitrique varient pour l'ensemble des stations de 62,7 à 123,2 mg/100g de terre ; de 51,00 à 77,30 mg/100g de terre dans les sols rhizosphériques de l'olivier et du figuier respectivement (Tableau 25). Les teneurs en potassium non échangeable varient de 34,01 à 96,02 mg/100 g de terre et de 15,39 à 49,30 mg/100 g de terre dans la rhizosphère de l'olivier et du figuier respectivement (Tableau 25).

Le potassium soluble augmente significativement ($p \leq 0,04$ pour l'olivier et $p \leq 0,026$ pour le figuier) dans la rhizosphère des deux espèces (Figure 44 a). Le sol rhizosphérique des deux espèces s'est enrichi en potassium assimilable (Figure 44 b) en moyenne de 19% pour l'olivier et de 12,9% pour le figuier. Néanmoins cette concentration en potassium assimilable à proximité des racines reste non significative ($p = 0,07$) pour l'olivier mais significative ($p \leq 0,05$) pour le figuier. Le potassium extrait à l'acide nitrique augmente significativement dans la rhizosphère des deux espèces (Figure 44d). Le potassium extrait à l'acide nitrique augmente en moyenne de 11,47% et de 8,76% dans le sol rhizosphérique de l'olivier et du figuier comparativement au sol global. Il suit la tendance suivante $KHNO_3RHO > KHNO_3GO > KHNO_3RH > F KHNO_3GF$. Le potassium non échangeable (K_{ne}) augmente dans le sol rhizosphérique de l'olivier des stations Nezla, Bouira et Guendoul. Le sol rhizosphérique du figuier des stations de Guendoul et Nezla voit son potassium non échangeable augmenter. Le K_{ne} du sol à proximité des racines de la station de Bouira est comparable à celui du sol global. L'examen de la figure 44 c montre que la station de Tizi-Rached se singularise quant à ses teneurs en K non échangeable dans la rhizosphère du figuier et de l'olivier. En effet, le K_{ne} diminue systématiquement dans la rhizosphère des deux espèces. Ce résultat pourrait trouver son explication dans la nature minéralogique des argiles de cette station.

Nous avons observé que sur différents types de sols à statut initial différencié, deux espèces fruitières typiques du Bassin Méditerranéen ont induit une augmentation significative

du potassium soluble, du potassium assimilable pour le figuier, mais non significative pour l'olivier à proximité de leurs racines. Des résultats similaires sont observés par divers auteurs pour des études portant sur la rhizosphère d'arbres forestiers ou de plantes cultivées au champ, dans des conditions écopédologiques variées. Ces études ont montré une plus forte concentration du potassium dans le sol rhizosphérique comparativement au sol global (Majdi et Bergholm (1995) ; Bagayoko et al., 2000; Chiu et al., (2002); Chen et al., 2006; Zhu et al., 2006 ; Dinesh et al., 2010).

Ces niveaux plus élevés en potassium biodisponible seraient la résultante de deux processus à savoir la libération de potassium dans la rhizosphère et son prélèvement par la racine des arbres.

La solution du sol rhizosphérique s'enrichit en potassium par mass flow, par l'altération accrue des minéraux près des racines (Hinsinger et al. 1993; Wang et Zabowsky, 1998 ; Norouzi et Khademi, 2010), par la décomposition de la matière organique, par le transport et l'accumulation du potassium par les mycorhizes (Finley 1992, 1995, Arocena et Glowa, 2000) dans la rhizosphère. Il est intéressant de noter que l'ensemble des racines des deux espèces étaient infectées par des mycorhizes (Nait Kaci et al., 2010). Wang et Zabowsky, (1998), Yanai et al., (2000), Turpault et al., (2005) dans leur étude sur l'effet de la racine de *Pseudotsuga menziesii* et *Picea abies* et Zhu et al., (2006) dans son étude sur le thé ont conclu que l'accumulation du potassium dans la rhizosphère était causée par la prédominance de la libération du potassium dans la rhizosphère sur le prélèvement racinaire du potassium. En effet le prélèvement du potassium par la racine de l'olivier et du figuier serait moins important. 3

Le figuier étant aussi en période de repos hivernal, voit son prélèvement en potassium de même réduit. Dans le cas présent, il semblerait que les processus de la rhizosphère qui induisent une libération du potassium, couplés à un prélèvement réduit du potassium par la racine de l'olivier et du figuier, ont conduit à un enrichissement en potassium de la solution du sol rhizosphérique comparativement à celle du sol global. Dès que la concentration en potassium augmente dans la solution du sol rhizosphérique, le potassium est immédiatement adsorbé par les sites planaires (augmentation du K^+NH_4^+) mais aussi fixé par les sites de serrages (augmentation de K^+ne). Ces processus étaient d'autant plus importants que le taux des argiles augmentait au voisinage de la racine. Violante et al., (1998), Vincenzo et al., (2003) ont trouvé des résultats similaires pour une culture de maïs en plein champ.

Malgré des différences significatives, une série de relations significatives et positives relie le pH, le carbone du sol, ($r=0,99***$; $r=0,95***$ $n=8$) des sols globaux à celles des sols rhizosphériques pour les deux espèces. Ces corrélations entre les propriétés des sols globaux et rhizosphériques ont montré qu'il existait des relations dynamiques entre le sol global et le sol rhizosphérique. Le KNH_4^+ rhizosphérique semblerait lié au carbone organique rhizosphérique des deux espèces (Figure 45.b). Cette tendance n'existe pas dans le sol global (Figure 45.a). On peut avancer comme explication une adsorption du potassium sur des rhizodépôts comme le mucilage ou une exsudation de potassium par les racines.

F- Distribution du potassium dans la rhizosphère en relation avec l'espèce : l'olivier (*Olea europea* L.) et le figuier (*Ficus carica* L.)

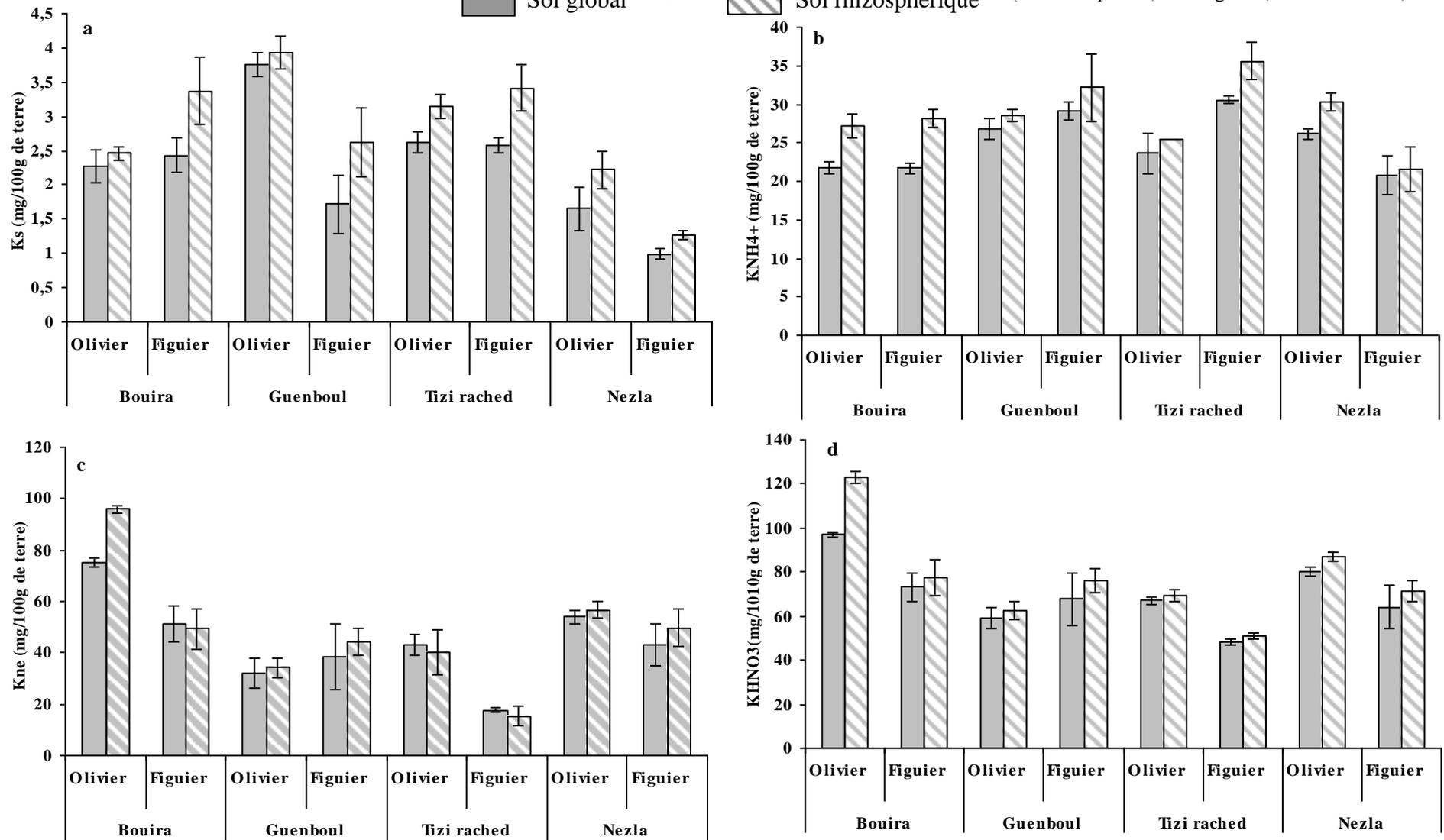


Figure 44 Formes biodisponibles du potassium du sol global et du sol rhizosphérique. Ks (a), KNH₄⁺ (b), Kne(c) et KHNO₃(d).

2.5. Comparaison entre les deux espèces

Malgré que la fraction argileuse sous *Olea europea* L. et sous *Ficus carrica* L. montre la tendance suivante ARHF>AGF>ARHO>AGO, le sol à proximité des racines de l'olivier montre une augmentation de 10,2% d'argiles, plus importante que celle du figuier qui est de l'ordre de 8,83%.

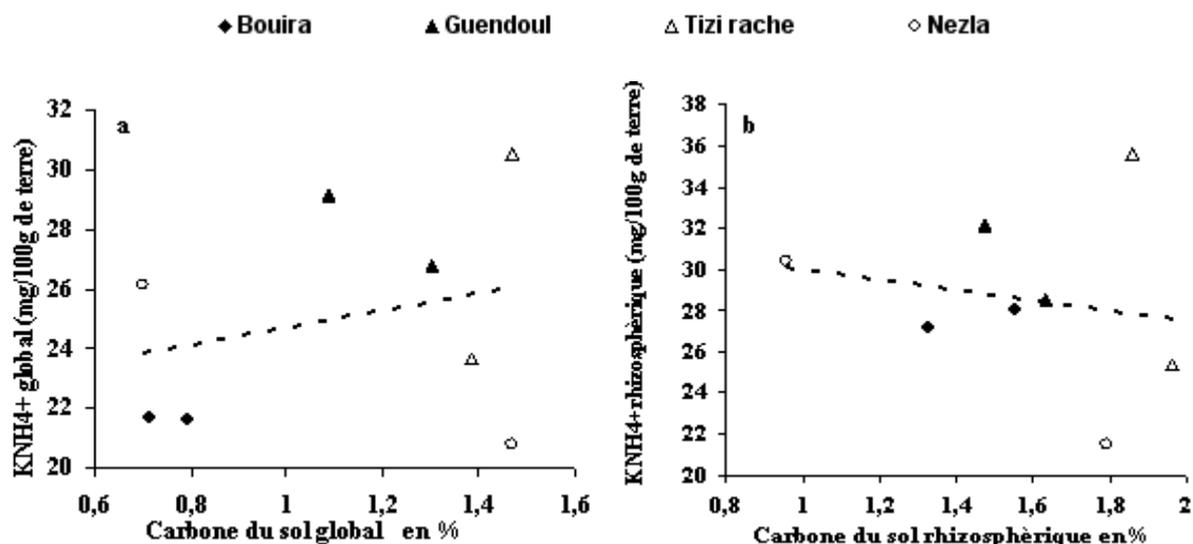


Figure 45 Relations entre le KNH_4^+ et le carbone du sol dans le sol global et le sol rhizosphérique.

La teneur en carbone total du sol global de l'olivier et du figuier a diminué respectivement de 31,42% et de 24,78% comparativement au sol rhizosphérique. Le carbone du sol rhizosphérique des deux espèces suit la tendance suivante : CRHO>CRHF>CGO>CGF. Ce qui précède indiquerait que la rhizosphère de l'olivier s'enrichirait mieux en matière organique du sol mais aussi dans une moindre mesure en argiles que le sol à proximité de la racine du figuier. Chiu et al., (2002), Chen et al., (2006) ; Dinesh et al., (2010) ont déterminé un effet espèce ou génotype pour ce qui est de l'accumulation du carbone dans la rhizosphère. Turpault et al., (2007) ont lié cet enrichissement en carbone à la densité racinaire élevée et par conséquent à une importante exsudation de composés organiques. En effet, la densité racinaire de l'olivier est plus importante que celle du figuier avec une prépondérance de racine fine actives, ce qui pourrait expliquer l'accumulation de carbone plus importante dans la rhizosphère de l'olivier avec pour conséquence une meilleure agrégation des particules argileuses. On pourrait aussi

attribuer la quantité plus faible de carbone dans la rhizosphère du figuier à une diminution de la quantité de photoassimilats allouée aux racines en raison de la défoliation des figuiers.

L'enrichissement en CEC dans la rhizosphère de l'olivier et du figuier est semblable quoique légèrement plus élevée pour l'olivier, à savoir 10,64 et 8,75% pour le figuier.

Le potassium soluble qui a diminué de 19% et de 28% dans le sol global de l'olivier et du figuier respectivement, suit la tendance suivante : $K_{SRHO} > K_{SGO} > K_{SRHF} > K_{SGF}$.

Le potassium assimilable qui augmente de 19,1% et de 12,9% dans la rhizosphère de l'olivier et du figuier respectivement, suit la tendance suivante $KNH_4RHO > KNH_4RHF > KNH_4GF > KNH_4GO$.

Le potassium extrait à l'acide nitrique augmente de 11,47% et de 8,76% dans le sol rhizosphérique de l'olivier et du figuier comparativement au sol global et suit la tendance suivante $KHNO_3RHO > KHNO_3GO > KHNO_3RH > F KHNO_3GF$.

L'accumulation des formes biodisponibles du potassium dans la rhizosphère de l'olivier semblerait plus élevée comparativement au figuier. Cet enrichissement plus important en potassium du sol rhizosphérique de l'olivier pourrait s'expliquer par une intensité plus élevée des processus rhizosphériques comme le mass flow chez l'olivier en raison de la présence de feuilles. En effet, la transpiration plus élevée de l'olivier induit un mass flow plus important donc une concentration plus conséquente des solutés dans la solution du sol à proximité des racines. A l'opposé, il se pourrait que pour le figuier le mass flow ait considérablement diminué en période de repos végétatif (absence de feuilles). En effet, Vidaud et al. (1997) signalent que les besoins les plus importants en eau du figuier correspondent à sa période de forte croissance.

Grayston et al. (1996) soulignent que la quantité et la qualité des rhizodépôts sont sous le contrôle génétique des plantes. Smith (1976) qui a analysé les exsudats racinaires de trois espèces forestières échantillonnées en conditions naturelles a montré que ces dernières avaient libéré des cations suivant l'ordre décroissant Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , NH_4^+ et Mg^{2+} , le K^+ et le Ca^{2+} étant libérés en quantité beaucoup plus importante que NH_4^+ et Mg^{2+} , avec une différence allant du simple au triple pour l'une des espèces forestières *Betula alleghaniensis* L. Il se pourrait aussi que les différences observées au niveau des rhizosphères de l'olivier et du figuier soient liées dans une certaine mesure à la qualité des exsudats racinaires des deux espèces.

Pour ce qui est de l'analyse statistique, nous n'avons pas déterminé de différence significative entre l'effet rhizosphérique de chacune des espèces. A priori, malgré que l'olivier conserve ses feuilles et par conséquent pourrait être plus actif au niveau physiologique, l'impact de la racine de l'olivier et du figuier sur les sols serait semblable. Marschner et al., (2005) montraient des différences significatives sur la composition et le fonctionnement de communautés microbiennes de 3 variétés d'arbres du genre *Bankia*, par contre ils n'existaient pas de différences significatives pour le pH, le carbone du sol et l'azote total dans la rhizosphère. L'effet analogue de l'olivier et du figuier (adaptées à des sols souvent pauvres en éléments nutritifs) sur le sol à proximité immédiate de la racine pourrait suggérer qu'il existe un effet général de ces deux espèces méditerranéennes sur la rhizosphère. Toutefois, en raison d'une biomasse racinaire plus importante, le volume de sol prospecté par l'olivier serait plus élevé. Par conséquent le volume de sol d'olivier soumis à l'effet rhizosphérique s'accroît comparativement à celui du figuier. Rapporté à l'échelle de l'agro système, le volume de sol amélioré par l'effet rhizosphérique de l'olivier est bien plus important que celui du figuier. En plus de l'apport de litière, du maintien d'un couvert végétal toute l'année, la stratégie du système racinaire de l'olivier fait de cet arbre une espèce à conseiller pour la valorisation des sols marginaux souvent déficients en matière organique du sol et en éléments nutritifs.

3. Conclusion

Les propriétés physiques et chimiques de la rhizosphère de *Olea europea* L. et de *Ficus carica* L. sont différentes de celles des sols globaux sur des sols à statut initial différent. Par contre nous n'avons pas déterminé de différence significative entre les deux espèces fruitières. Le taux d'argiles, le carbone du sol, la CEC étaient significativement plus élevées dans la rhizosphère des deux espèces. Le carbone du sol a montré une variation entre les deux espèces avec une concentration plus importante pour l'olivier.

Les teneurs en potassium biodisponible, le K_s , KNH_4^+ , $KHNO_3$, ont augmenté dans la rhizosphère des deux espèces, mais de façon plus importante à proximité de la racine de l'olivier. 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. 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 assimilés alloués aux racines et le mass flow généré par l'absorption de l'eau en réponse à la transpiration contribueraient à modifier 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.

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 *Olea europea* L. et *Ficus carica* L. sur le sol.

G-Impact de la racine sur la minéralogie des sols en relation avec l'espèce l'olivier (*Olea europea* L.) et le figuier (*Ficus carica* L.)

Introduction

L'impact de l'activité des plantes sur l'évolution des sols, à savoir l'altération des minéraux argileux par acidification des sols (Alekseeva et al., 2011) est assez bien connu. Plus récemment, au lieu d'une destruction des réseaux cristallins des argiles, certains auteurs décrivent une stabilisation des argiles illitiques par remontée biologique du potassium (He et al., 2008 ; De Cheng et al., 2011) et de la silice (Barré et al., 2009). Il est généralement admis que l'évolution des minéraux argileux dans les sols est lente, ce qui ne permet pas de mesurer des changements dans la minéralogie des sols à des échelles de temps relativement court (Turpault et al., 2008). Toutefois, des résultats d'études sur la minéralogie à l'interface sol-racine (April et Keller, 1990; Courchesne et Gobran 1997 ; Gobran et al. 1998 ; Augusto et al., 2001), ont permis de formuler l'hypothèse d'une évolution rapide, in situ, des minéraux argileux dans la rhizosphère d'arbres forestiers.

Les processus de la rhizosphère peuvent affecter la composition minéralogique de la fraction argileuse des sols à fortiori, des propriétés du sol telles que la capacité d'échange cationique et les formes biodisponibles du potassium. Turpault et al., (2007) soulignent que les modifications de certaines propriétés du sol comme la capacité d'échange cationique et la biodisponibilité du potassium dans la rhizosphère pourraient être liée à celles de la composition minéralogique des argiles à l'interface sol/racine. Barré et al., (2007b) ont déterminé un effet racinaire sur les minéraux argileux qui se traduit par des changements qualitatifs et quantitatifs de la fraction argileuse. Cette dernière est considérée par ces auteurs comme une bonne indicatrice de l'effet racinaire.

Cette évolution des minéraux à proximité de la racine est liée à des processus de la rhizosphère comme la rhizodéposition (Gobran et al., 1998) et au prélèvement des nutriments. La qualité des litières, des rhizodépôts, le prélèvement de l'eau et des nutriments par les plantes induit un impact différent des espèces forestières tempérées (Gobran et Clegg 1996 ; Gobran et al., 1998 ; Wang et Zabowsky 1998 ; Turpault et al., 2007 ; Calvaruso et al., 2011) et tropicales (Chen et al., 2002; Chiu et al., 2002 ; Dinesh et al., 2010) sur le sol à proximité des racines.

La transformation par les racines des minéraux argileux en conditions contrôlées est assez bien documentée, (Hinsinger et al., 1992 ; Arocena et Glowa, 2000 ; Barré et al., 2007 b; Khademi et Arocena, 2008). En conditions naturelles, les travaux de April et Keller (1990) ; Gobran et Clegg (1996) ; Courschesne et Gobran (1997) ; Gobran et al., (1998) ; Augusto et al., (2000) ; (2001) ; Turpault et al., (2008) sur des écosystèmes forestiers tempérés, ont mis en évidence la transformation in situ de minéraux argileux dans la rhizosphère d'espèces pérennes. Verboom et al., (2010) détectent la néoformation de dépôts d'argiles enrichis en Al-Fe-Si autour des racines fines d'eucalyptus implantés sur dunes en Australie.

Dans le chapitre précédent, nous avons établi que la racine de l'olivier et du figuier modifiait les propriétés chimiques et la distribution du potassium dans leur rhizosphère. A l'instar de transformation in situ de la minéralogie dans la rhizosphère d'espèces forestières, on pourrait envisager que les racines d'espèces fruitières méditerranéennes comme *Olea europae* L. et *Ficus carica* L. puissent affecter les argiles à l'interface sol-racine et par la même affecter la biodisponibilité et la dynamique du potassium dans la rhizosphère.

Les objectifs de ce travail sont de i) déterminer s'il y a modification de la minéralogie des argiles à l'interface sol-racine de l'olivier et du figuier ii) comparer la minéralogie des argiles du sol rhizosphérique de ces deux espèces fruitières méditerranéennes iii) relier les différentes populations d'argiles des sols globaux et rhizosphériques à certaines propriétés chimiques et potassiques des sols.

1. Matériel et méthodes

1.1. Sols des vergers

Les sols utilisés sont ceux échantillonnés dans les vergers d'oliviers et de figuiers des sites de Guendoul, Nezla, Tizi Rached et Bouira. L'analyse des argiles a porté sur les sols globaux et rhizosphériques des vergers de *Olea europea* L. et de *Ficus carica* L.

1.2. Analyse des argiles

L'extraction des argiles a été réalisée selon la méthode physique. Chaque suspension d'argiles du sol global et rhizosphérique des deux espèces est divisée en 3 fractions : la première fraction d'argile est saturée au SrCl₂, la seconde au KCl. La troisième fraction

qualifiée de naturelle, n'est pas saturée mais centrifugée afin de recueillir les argiles. C'est sur cette fraction que sera extrait le potassium non échangeable à l'acide nitrique des argiles.

Quelques gouttes de chaque suspension d'argiles sont déposées sur des lames de verre pour obtenir des échantillons orientés. En tout 32, lames sont confectionnées. Les échantillons orientés sont analysés avec un diffractomètre de marque Rigaku utilisant la radiation au cuivre. Les diffractogrammes sont collectés avec un pas de 0.05° pendant 3 secondes entre 4 et $35^\circ 2\theta$. Les diffractogrammes sont traités avec le logiciel Decomp selon la méthode de décomposition des courbes donnée par Lanson (1997) et la position de l'abscisse centre de gravité de chaque échantillon d'argile est également calculée.

1.3. Analyses statistiques

Les analyses statistiques sont effectuées à l'aide du logiciel R. Les comparaisons entre les caractéristiques minéralogiques du sol global et du sol rhizosphérique sont réalisées en utilisant le test apparié.

2. Résultats et discussion

2.1. Identification des différents minéraux

Les diffractogrammes des argiles saturées au strontium des sols globaux des vergers des quatre sites étudiés présentent une composition minéralogique assez proche. Les diffractogrammes montrent la présence d'un pic de quartz ($d=0,427\text{nm}$), d'illite ($d_{001}= 1\text{nm}$; $d_{002}= 0,5\text{ nm}$) et de kaolinite ($d_{001}= 0,722\text{ nm}$; $d_{002}= 0,358\text{ nm}$) (Figure 46). La présence d'un pallier d'interstratifiés compris entre 2,2 et 2,9nm correspondant à des inter-stratifiés Illite/Smectite, Illite/Vermiculite, Illite/Chlorite, Chlorite/Vermiculite ou Chlorite/Smectite est observé. Les pics autour de 1,44 nm pourraient correspondre à différents minéraux silicatés, cela pourrait être, de la vermiculite, de la chlorite gonflante ou la deuxième réflexion d'un interstratifié Chlorite/Vermiculite. Ce pic est le plus marqué pour les argiles des sols globaux de Bouira et Guendoul (Figure 47.a ; 48.a ; 49.a et 50.a). En revanche il apparaît fortement réduit pour les argiles des sols de Nezla. Le cortège minéralogique des argiles des sols globaux et rhizosphériques sont très proches (Figure 46).

2.2. Les argiles du sol sont-elles modifiées à proximité de la racine ?

Barré et al., (2007 b) soulignent que pour comparer des diffractogrammes d'argiles, l'abscisse du centre de gravité des argiles des diffractogrammes décomposés peut être considérée comme un bon indice de modification de ces dernières : une augmentation de la valeur de l'abscisse du centre de gravité (en $^{\circ}2\theta$) signifie une augmentation du nombre de feuillets illitiques, alors qu'une augmentation de feuillets de smectite ou de vermiculite diminuerait la valeur de l'abscisse du centre de gravité. L'utilisation de l'abscisse des centres de gravité nous a permis de comparer les diffractogrammes décomposés des argiles du sol global et du sol rhizosphérique de *Olea europea* L. et de *Ficus carica* L.

Les abscisses des centres de gravité (en nm) plus faibles et/ou le déplacement des pics des populations d'argiles saturées au strontium comme PCI, I/S et S/I dans la rhizosphère de l'olivier vers le domaine de l'illite (Figure 47.a et Figure 48.a) indiquent une augmentation du nombre de feuillets d'illite à proximité de la racine de l'olivier.

Pour Bouira, l'aire relative de C/V et de S/I qui décroît et l'augmentation concomitante de l'aire relative de PCI à proximité de la racine de l'olivier (Tableau 26 ; Figure 48a) comparativement aux argiles du sol global vient confirmer un gain de feuillets illitiques dans le sol de la zone racinaire.

Tableau 26 : diminution de l'abscisse du centre de gravité dans la rhizosphère de l'olivier et augmentation du gain en centre de gravité dans la rhizosphère du figuier comparativement à celle de l'olivier.

Stations	Fractions de sol	Aire relative PCI (Sr)	Aire relative Illite (Sr)	Cg Sr en nm	CgSr en °2θ	Cg K en nm	CgK en °2θ	ΔCg %
Guendoul	GO	6,9	8,3	1,26	7,01	1,13	7,77	9,8
	RhO	7,0	8,5	1,25	7,16	1,15	7,68	6,7
	GF	7,9	13,1	1,26	7,03	1,16	7,62	7,4
	RhF	5,6	8,5	1,26	7,03	1,15	7,71	8,8
Bouira	GO	15,2	20	1,21	7,3	1,15	7,68	4,9
	RhO	22	27,5	1,14	7,68	1,12	7,9	2,8
	GF	20,7	34,2	1,16	7,65	1,13	7,84	2,4
	RhF	17,6	31,5	1,18	7,49	1,12	7,92	5,4
Nezla	GO	3,6	5,6	1,3	6,81	1,16	7,65	11
	RhO	5,6	9,3	1,26	7	1,18	7,53	7
	GF	5,8	13,1	1,24	7,11	1,15	7,67	7,3
	RhF	4,2	6,5	1,3	6,83	1,15	7,71	11,4
Tizi-Rached	GO	4,3	6,9	1,42	6,21	1,12	7,4	16,1
	RhO	7,5	10,1	1,3	6,83	1,21	7,31	6,5
	GF	3,72	5,77	1,34	6,56	1,22	7,34	10,6
	RhF	3,05	4,72	1,34	6,57	1,19	7,41	11,3

$$\Delta Cg \% = Cg K - Cg Sr * 100 / Cg K$$

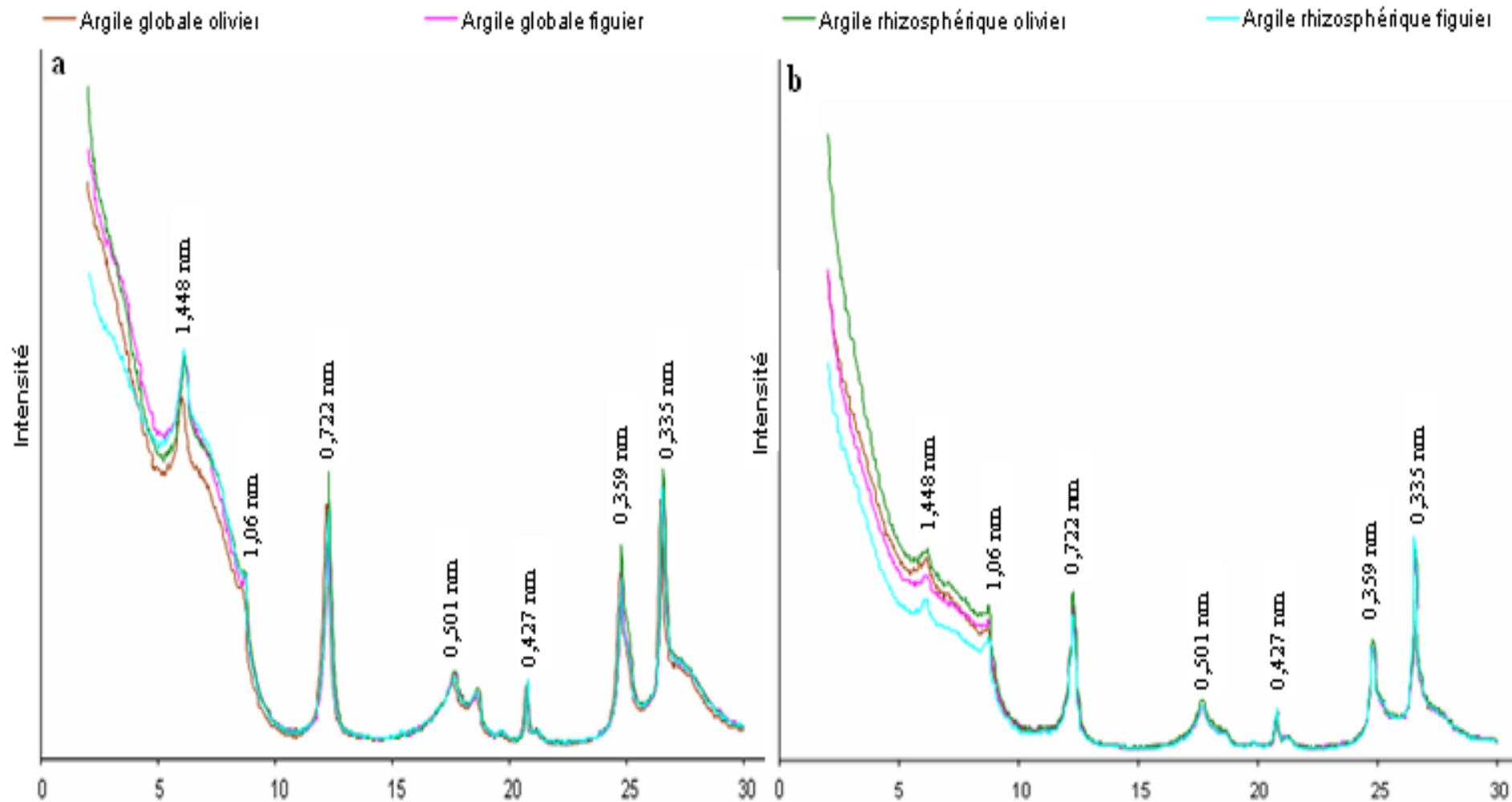


Figure 46 Diffractogrammes des argiles saturées au strontium des deux fractions de sol de l'olivier et du figuier de la station de Guendoul (a) et de la station de Bouira (b).

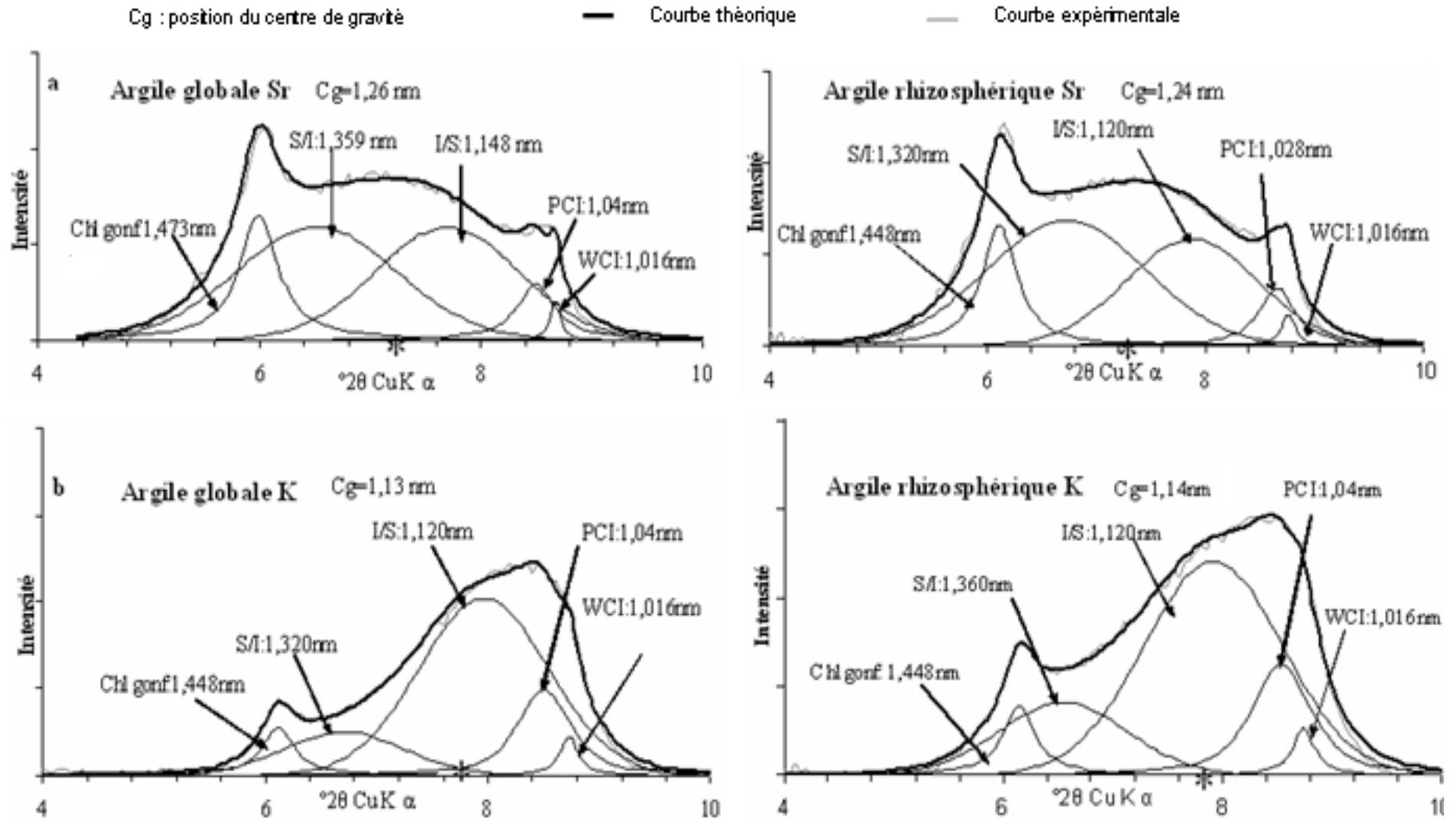


Figure 47 Diffractogrammes décomposés des argiles du sol global et du sol rhizosphérique de l'oliveraie de Guendoul.

La vermiculite présente dans les argiles du sol global de l'olivier de la station de Bouira a fixé du potassium, ce qui a conduit à la formation de feuillets d'illites qui enrichissent ainsi les populations de PCI et I/S dans la rhizosphère. Ces résultats sont en accord avec ceux de Courschesne et Gobran (1997), Gobran et al., (1998), qui ont mis en évidence une diminution significative de la quantité de vermiculite à proximité de la racine pour des podzols d'écosystèmes forestiers acides. De même, April et Keller (1990), ont observé une diminution de l'intensité du pic de la vermiculite dans le sol rhizosphérique avec une intensification concomitante de celui de l'illite dans le rhizoplan de sols forestiers acides. L'examen des diffractogrammes de décomposés des argiles rhizosphériques saturées au strontium du figuier, révèle une absence de déplacement vers le domaine de l'illite pour les stations de Guendoul (Figure 49.a) et Tizi-Rached.

Pour les stations de Bouira (Figure 50a) et de Nezla, un déplacement quoique limité de l'abscisse du centres de gravité, de I/S et de S/I vers le domaine des petits angles (smectite) est observé.

La saturation au potassium des argiles des sols a diminué (en nm) les abscisses des centres de gravité des deux fractions de sol et pour les deux espèces (Tableau 26, Figure 47b ; 48b ; 49b ; 50b) ce qui accroît les populations de PCI et I/S par formation de feuillets illitiques (Tableau 26). Cette diminution systématique des abscisses du centres de gravité est démontrée statistiquement ($p \leq 0,04$) par un gain en centre de gravité pour l'ensemble des échantillons d'argiles soumis à une saturation au potassium. Ce qui précède montre que la fraction fine des sols globaux et rhizosphériques des deux espèces fruitières pourraient encore mettre en réserve du potassium en position inter foliaire sous forme de feuillet d'illites.

Effet des espèces sur la minéralogie des argiles

Les argiles du sol rhizosphérique de l'olivier et du figuier soumises à une saturation au potassium se distinguent par un comportement opposé à celui des argiles saturées au potassium des sols globaux des deux espèces. En effet, il semblerait que les argiles du sol global de l'olivier offriraient une meilleure capacité à mettre en réserve le potassium sous forme non échangeable dans les feuillets d'illite comparativement aux argiles du sol rhizosphérique. Ceci est révélé par un gain en centre de gravité plus faible pour les sols rhizosphériques de l'olivier comparativement au sol global (Tableau 26).

Cette augmentation plus faible du nombre de feuillets d'illites dans la rhizosphère de l'olivier sous l'effet d'un apport de potassium suggérerait que les argiles à proximité des racines étaient déjà enrichies naturellement en feuillets d'illite. Par contre, pour les argiles des sols sous figuiers un comportement inverse est observé. Les argiles des sols rhizosphériques fixent plus de potassium que les argiles des sols globaux.

Ceci est confirmé par le calcul du gain en centre de gravité qui est plus important pour le sol rhizosphérique du figuier (Tableau 26) cet effet différent des deux espèces sur la fraction argileuse est confirmée par l'analyse statistique qui révèle une différence significative de l'interaction sol-espèce ($p \leq 0,04$) sur le centre de gravité des argiles saturées au potassium. La mise en réserve in situ du potassium par la fraction argileuse du sol rhizosphérique de l'olivier révélée par la diffraction des RX a déjà été observée pour d'autres espèces d'arbres sur sols forestiers (épinette rouge et bouleau jaune) dans les Smoky Mountains (USA) par April et Keller (1990) et pour le douglas par Turpault et al., (2008) dans les montagnes du Beaujolais (France).

Pour April et Keller (1990), cette fixation du potassium par les argiles de la rhizosphère se traduit par une intensification du pic de l'illite dans la rhizosphère. Pour Turpault et al., (2008) c'est plutôt une similitude des diffractogrammes des argiles de la rhizosphère saturés au calcium et au potassium ce qui indique la préexistence de ces feuillets d'illite dans la rhizosphère. Pour les sols cultivés (maïs), Violante et al., (1998) et Vincenzo et al., (2003) expliquent cette fixation du potassium plus élevée dans la rhizosphère par une plus forte sélectivité de cette dernière vis-à-vis du potassium comparativement au sol global. Par contre pour le figuier, la formation de feuillets illitiques ou la mise en réserve du potassium serait moins importante à l'interface sol- racine comparativement à l'olivier.

Cette différence d'impact des deux espèces sur un cortège minéralogique des argiles des sols globaux, somme toute, assez proche, serait liée au fonctionnement du système racinaire des deux espèces, mais aussi à la présence des feuilles chez l'olivier. En effet, il semblerait que l'activité de la racine de l'olivier ait un effet plus important sur le cortège minéralogique des argiles. Dans le chapitre précédent, malgré une absence de différence statistique entre les deux espèces, l'amplitude du changement de certaines propriétés des sols serait plus importante à proximité de la racine de l'olivier. C'est le cas de la teneur en carbone du sol, et de celles des formes de potassium biodisponible (K_s , KNH_4^+ , $KHNO_3$) qui sont plus élevées à proximité de la racine de l'olivier comparativement au figuier.

On pourrait en déduire que l'activité du système racinaire de l'olivier serait plus intense. Cette influence différente pourrait être liée, en partie du moins, à la différence entre les systèmes racinaires des deux espèces. Celui de l'olivier se distingue de celui du figuier par une biomasse racinaire plus élevée mais aussi par une architecture racinaire avec une prédominance de racines fines actives. Le fonctionnement du système racinaire de l'olivier pourrait accroître le mass flow (rendu plus efficace par un plus grand nombre de racines fines) induit par la transpiration de l'olivier qui a conservé ses feuilles en période de repos hivernal, comparativement au figuier qui lui a perdu les siennes et qui de plus montre une biomasse racinaire moins importante.

Comme le soulignent Grayston et al., (1996) la quantité et la qualité des rhizodépôts sont sous le contrôle génétique des plantes. Smith (1976) mesure une exudation de potassium par les racines de trois essences forestières, *Betula alleghaniensis* L., *Frangus grandifolia* L. et *Acer saccharum* L. échantillonnées en conditions naturelles avec une prédominance pour *Betula alleghaniensis* L. Cet impact différent de l'olivier et du figuier sur la minéralogie de la fraction argileuse pourrait aussi être lié à la quantité et à la nature des exsudats racinaires libérés par les deux espèces.

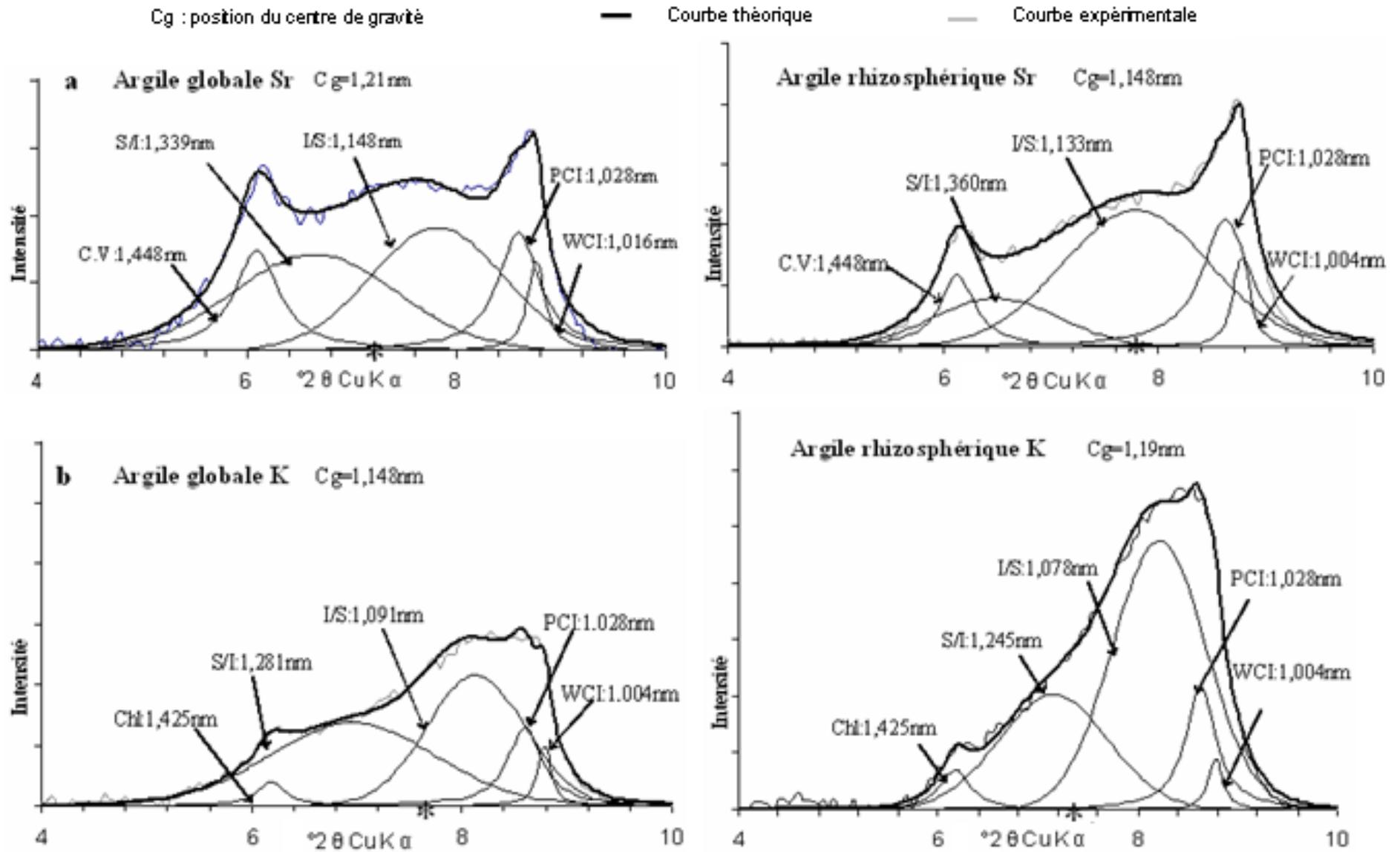


Figure 48 Diffractogrames décomposés des argiles du sol global et du sol rhizosphérique de l'olivieraie de Bouira.

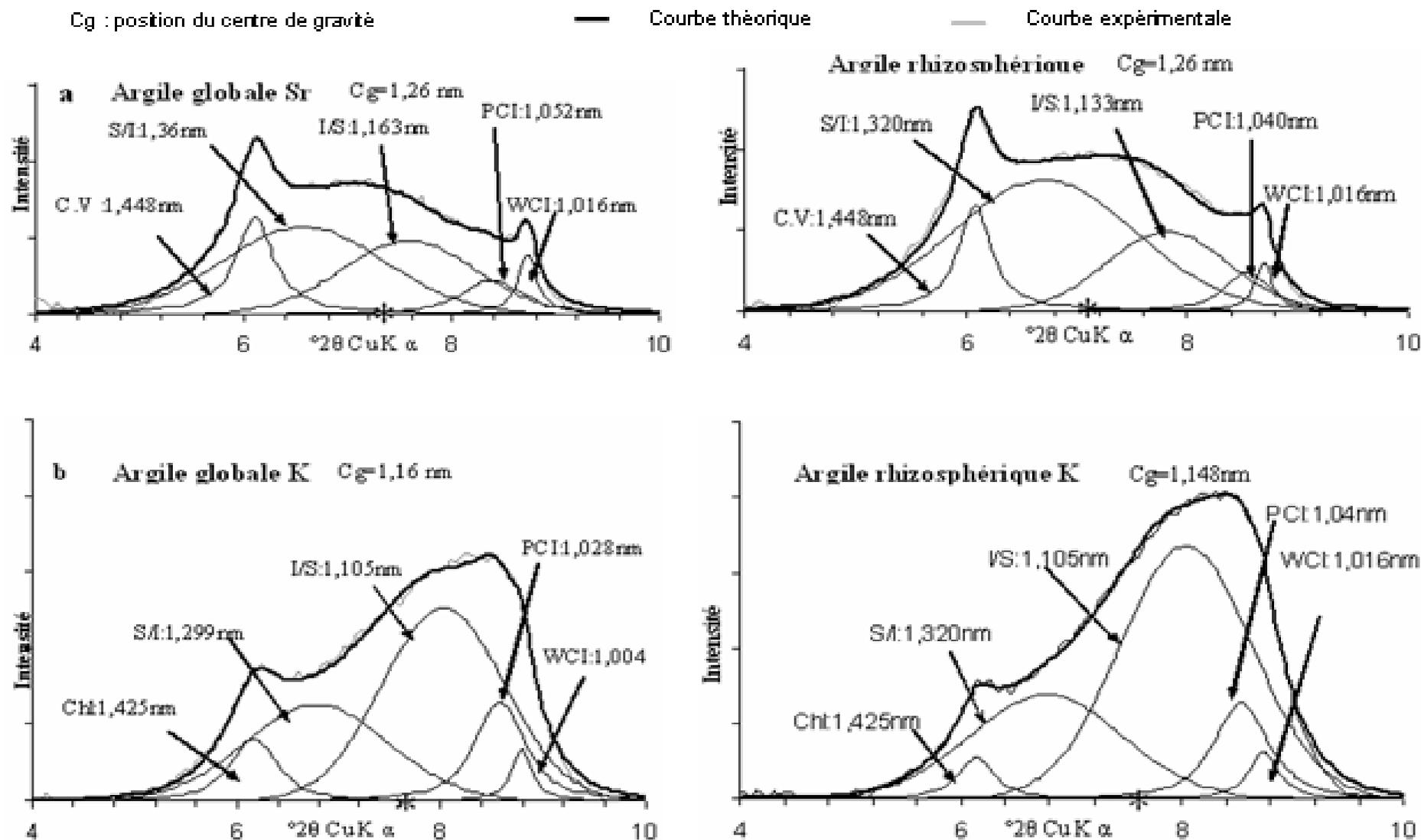


Figure 49 Diffractogrammes décomposés des argiles du sol global et du sol rhizosphérique de la figuieraie de Guendoul

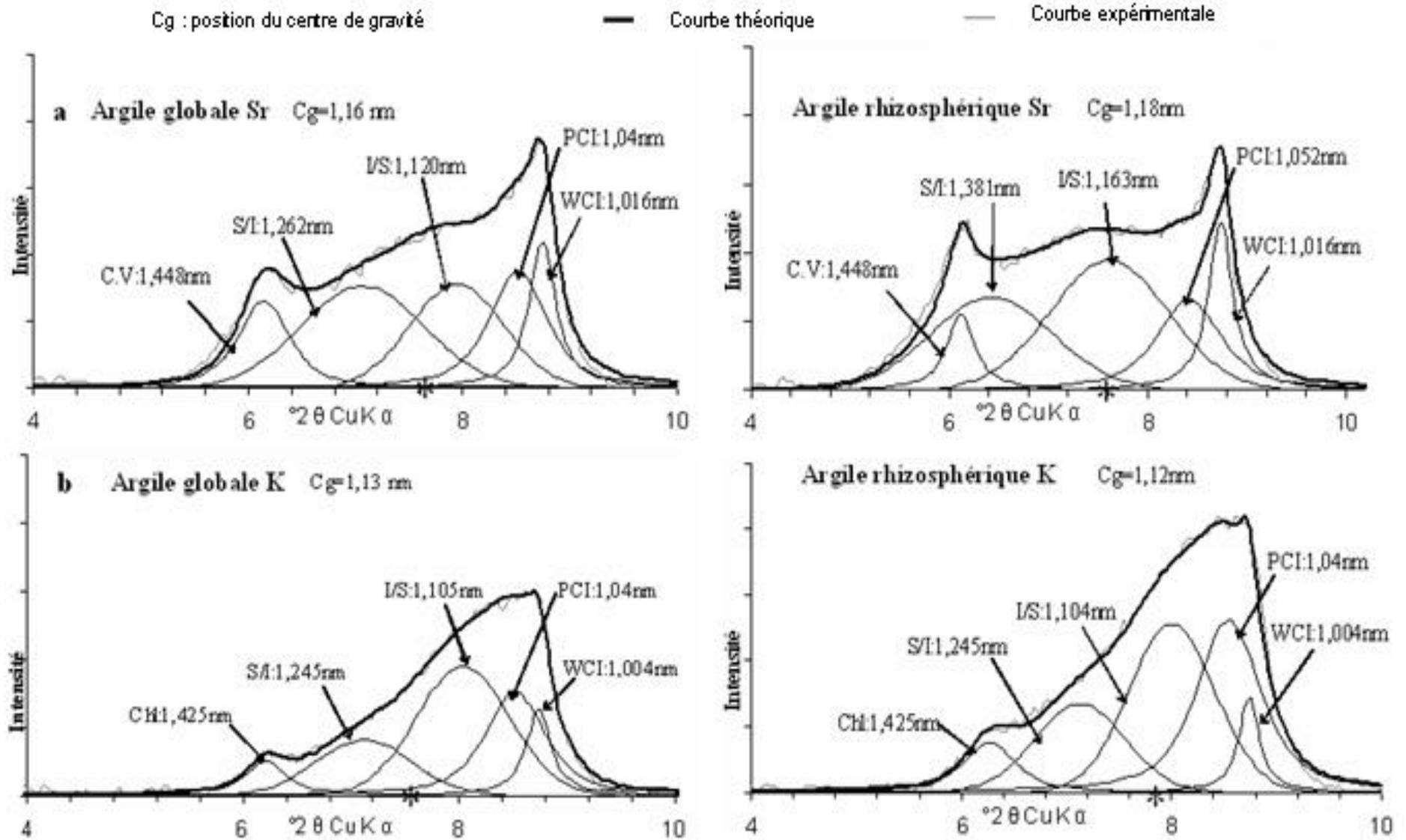


Figure 50 Diffractogrammes de décomposés des argiles du sol global et du sol rhizosphérique de la figueraie de Bouira.

La fixation plus importante de potassium dans la rhizosphère de l'olivier révélée par une augmentation du nombre de feuillets illitiques, s'expliquerait par une accumulation de potassium (mass flow et nature des exsudats racinaires) couplée à un prélèvement réduit de potassium par l'arbre en période de repos hivernal. Tout ceci induisant une mise en réserve plus accrue du potassium à l'interface sol-racine de l'olivier comparativement à celle du figuier.

Il est généralement admis qu'une agriculture sans fertilisation potassique engendre un appauvrissement des horizons de surface en potassium bio disponible, ce qui pourrait entraîner un prélèvement plus intense sur des pools plus difficilement échangeables. Le potassium interfoliaire prélevé par les plantes conduit à la formation de la vermiculite et au stade ultime de la smectite. Toutefois, Barré et al., (2007 a) dans leur synthèse sur l'évolution des quantités d'illites avec la profondeur des sols dans des écosystèmes forestiers et prairiaux ont montré une concentration en illite plus importante dans les horizons de surface. Ces auteurs expliquent que la remontée biologique du potassium à partir des horizons profonds, permet une formation de feuillets d'illites en surface par piégeage du potassium en position inter foliaire.

Dans notre cas, en plus de l'apport de potassium par la litière, nos résultats montrent que les processus de la rhizosphère dans l'agro système oliviers parviennent à limiter la déstabilisation de l'illite dans les horizons de surface. Néanmoins, le réapprovisionnement des horizons de surface en potassium par le jeu des cycles biogéochimiques et l'effet rhizosphérique ne peuvent probablement pas suffire à maintenir des quantités suffisantes de potassium dans l'agro système oliviers. En effet, à la différence des écosystèmes forestiers qui présentent des exportations limitées d'éléments nutritifs hors parcelle, les agro systèmes en général et celui de l'olivier en particulier, exportent annuellement de fortes quantités de potassium (par les olives pour l'agro système olivier).

Pour ce qui est de l'agro système figuiers, les quantités d'illites des sols globaux du figuier souvent proches ou même supérieures à celles de l'olivier (Tableau 26), indiqueraient que des processus lié à l'activité de l'arbre limiteraient aussi la déstabilisation de l'illite, probablement à une période plus active du cycle physiologique du figuier.

2.4. Relations entre les propriétés des sols et les populations d'argiles

La forte tendance qui se dégage entre la CEC et l'abscisse du centre de gravité (Figure 51.a). la CEC et l'aire relative de la population de S/I (Figure 51.b) indiquerait que la CEC s'accroît lorsque la composition minéralogique des argiles des sols étudiés s'enrichit en feuillets de smectite.

La CEC de la smectite est plus élevée que celle de l'illite, avec des valeurs autour de 100 cmol.kg⁻¹d'argiles. Il n'est donc pas surprenant que de la valeur de la CEC soit expliquée en partie par la population d'argile enrichie en smectite (S/I). Nursyamsi et al., (2008), établissent que pour des vertisols avec 63% d'argiles, les smectites contribuent à hauteur de 50% à la charge négative de ces sols. A l'opposé, une tendance à la diminution de l'abscisse du centre de gravité (en nm) lorsque les sols (Figure 51.c) et les argiles du sol (Figure 51.d) s'enrichissent en potassium non échangeable est observée. L'abscisse du centre de gravité aurait tendance à diminuer ou à se déplacer vers les grands angles (domaine de l'illite) lorsque les sols et plus particulièrement les argiles s'enrichissent en potassium non échangeable. L'abscisse du centre de gravité est liée à la quantité de feuillets illitiques contenue dans la fraction argileuse, il serait aussi une bonne approximation de la concentration en potassium total des argiles (Moore et Reynolds 1997).

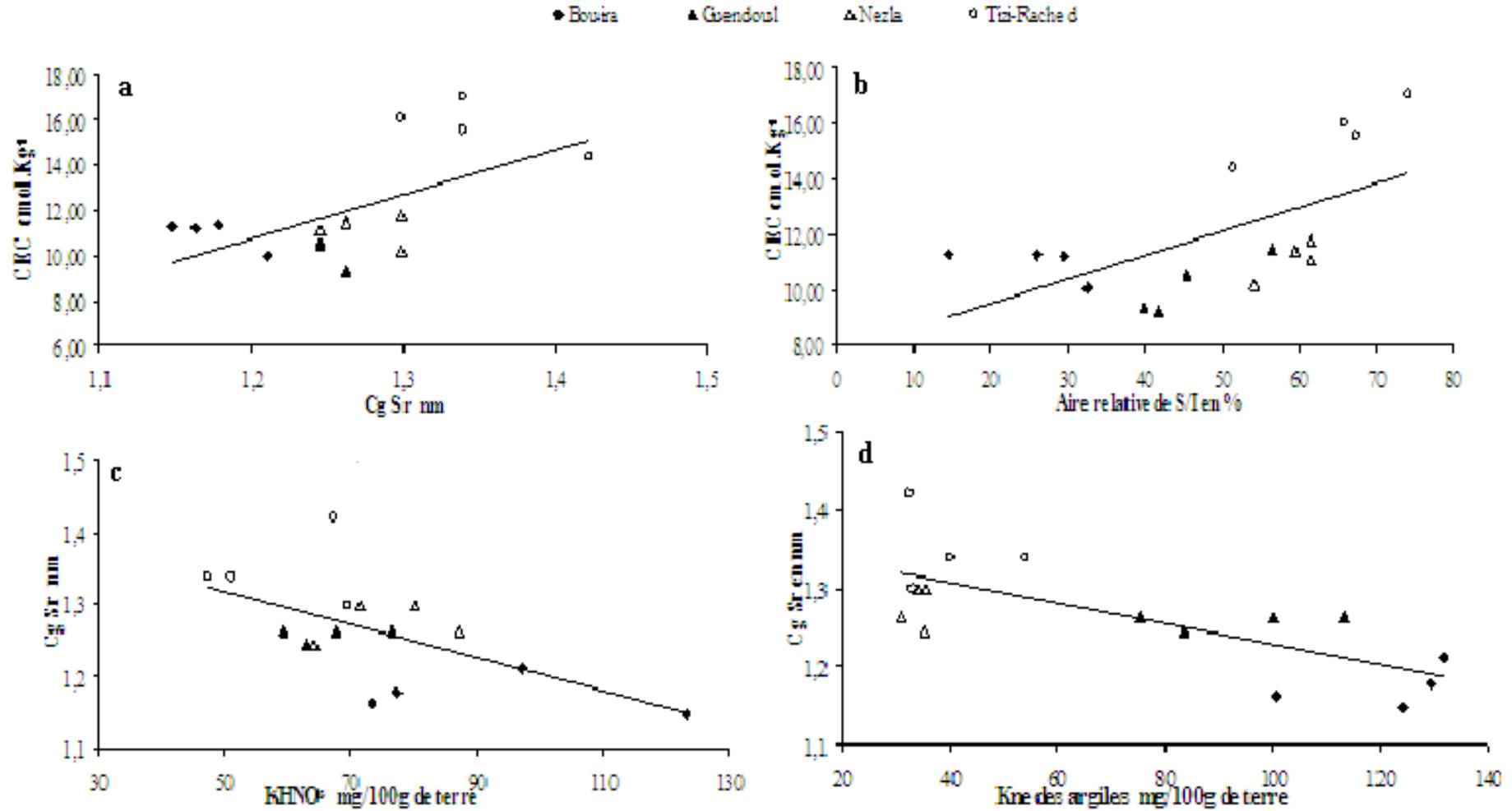


Figure 51 Augmentation de la CEC avec le déplacement de l'abscisse du Cg vers le domaine de la smectite (a) l'enrichissement en S/I des argiles contribue à accroître la CEC des sols (b), enrichissement des sols en potassium non échangeable avec le déplacement de l'abscisse du Cg vers le domaine de l'illite (c) et enrichissement des argiles des sols en potassium non échangeable biodisponible avec le déplacement de l'abscisse du Cg vers le domaine de l'illite (d).

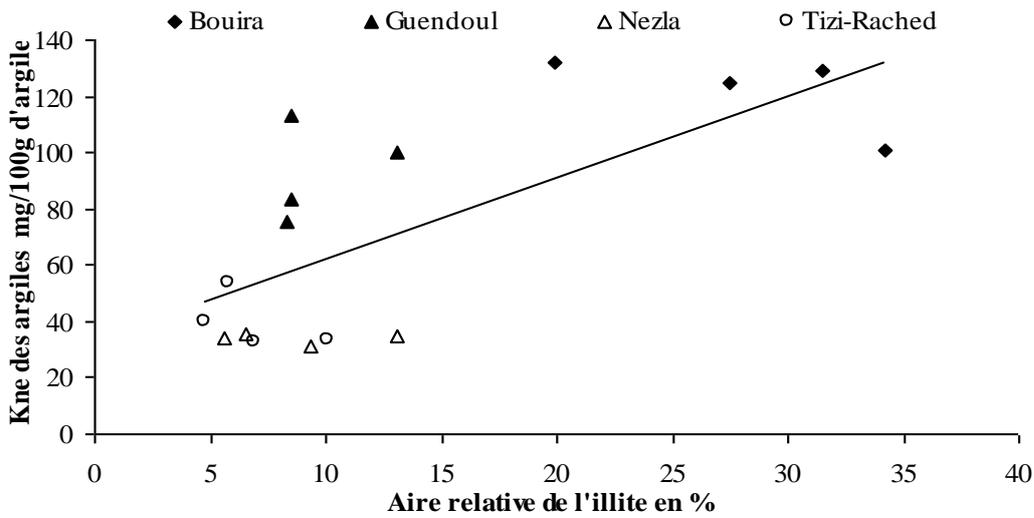


Figure 52 Relation entre l'aire relative de l'illite et le potassium non échangeable des argiles pour les deux fractions de sol des deux espèces.

L'accroissement des formes lentement biodisponibles du potassium des sols et des argiles avec les aires relatives des populations d'argiles d'illite et de PCI (Figure 52 et 53) et par contre leur diminution avec les aires relatives d'argiles riches en smectite (Figure 54) indiqueraient que ce sont les populations d'argiles enrichies en feuillets d'illites qui stockent le potassium non échangeable et non celles enrichies en feuillets de smectite.

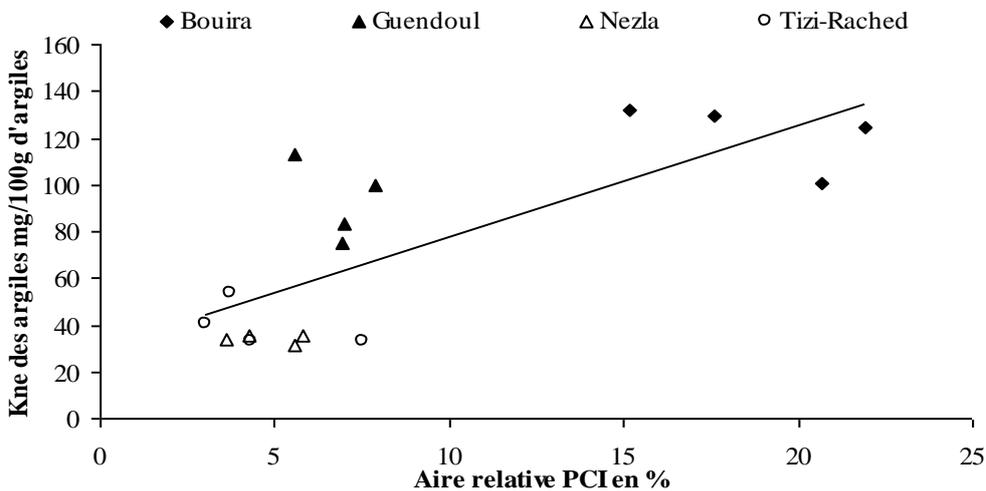


Figure 53 Relation entre l'aire relative de PCI et le potassium non échangeable des argiles pour les deux fractions de sol des deux espèces.

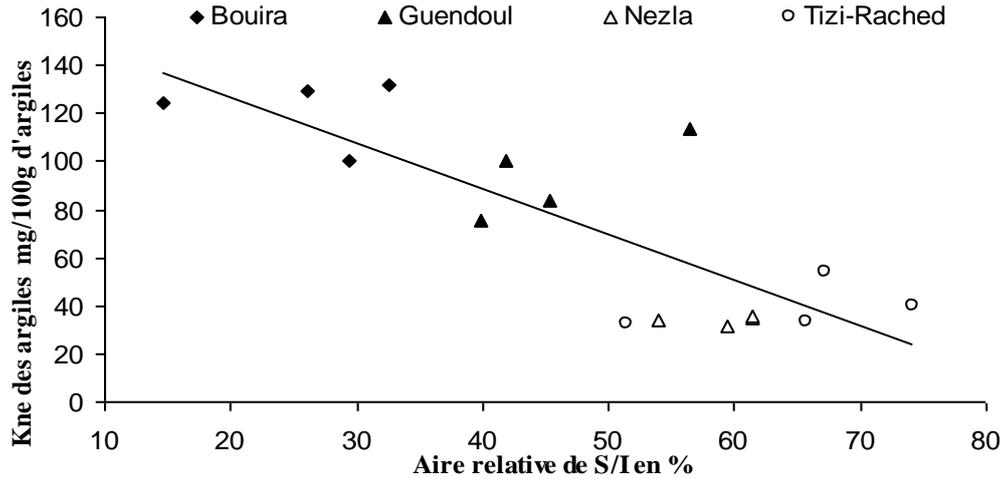


Figure 54 Relation entre l'aire relative de S/I et le potassium non échangeable des argiles pour les deux fractions de sol des deux espèces.

Surapaneni et al., (2002) dans une étude sur les relations entre la capacité de fourniture en potassium et la minéralogie des sols de Nouvelle-Zélande montrent que le K non échangeable mesuré après extraction séquentielle à l'acide nitrique N bouillant (STEP K) est significativement et positivement corrélé à la quantité de mica ($r = 0,87^{***}$) et significativement et négativement corrélé à la quantité de vermiculite ($r = -0,62^{**}$). Toujours sur des sols de Nouvelle-Zélande, Officer et al., (2006), de même, obtiennent des corrélations significatives et positives entre STEP K et la quantité de mica ($r = 0,79^{***}$), STEP K et MS (interstratifié Mica/Smectite) ($r = 0,54^{***}$). Avec les populations d'argiles enrichies en vermiculite, ces relations deviennent significatives mais négatives ($r = -0,70^{***}$). Rezapour et al., (2009) expliquent que ce type de corrélations suggère que ce sont principalement les sites en position interfoliaire des minéraux argileux qui libèrent le potassium non échangeable. Les corrélations plus fortes obtenus par ces auteurs comparativement aux nôtres trouveraient leur explication dans la taille plus importante du pool de potassium extrait comparativement à celui de notre étude. En effet, l'extraction avec l'acide nitrique bouillant N (Jackson, 1967) que nous avons utilisé ne permettrait d'extraire qu'une fraction du pool du potassium inter foliaire. Il en est de même de la relation entre l'abscisse du centre de gravité et le Kne des argiles (Figure 52).

Barré et al., (2008) qui ont procédé à la mesure du potassium total de la fraction argileuse par fluorescence ont obtenu une relation très hautement significative et négative entre l'abscisse du centre de gravité des argiles et le potassium des argiles. De plus, l'analyse statistique que nous avons utilisée pour établir l'existence de corrélations prend en compte

que les échantillons de sol testés ne sont pas indépendants. Le sol global de l'olivier et du figuier, ainsi que les sols rhizosphériques sont liés pour chaque station étudiée.

Barré et al., (2007 b) considèrent les feuillets d'illite comme un réservoir de potassium dans les sols qui peut être rempli par des apports de potassium mais aussi vidé par le prélèvement racinaire des végétaux. Dans l'agro système olivier et figuier que nous avons étudié, les applications d'engrais potassique sont inexistantes. Le réservoir de potassium pourrait se vider par prélèvement racinaire mais aussi se remplir grâce à la remontée biologique du potassium et l'accumulation du potassium à proximité des racines comme dans le cas de l'olivier. La remontée biologique du potassium associé à l'effet rhizosphérique contribue à limiter la déstabilisation des feuillets d'illite et la formation de smectite dans les horizons de surface et par conséquent à maintenir le pouvoir tampon de ces sols vis-à-vis du potassium, facteur essentiel de la fertilité potassique des sols. Raynauds (2010) souligne que la rhizosphère est un compartiment fondamental des écosystèmes terrestres en raison de son influence majeure sur les cycles biogéochimiques.

3. Conclusion

Nos résultats suggèrent que la minéralogie de la fraction fine des sols est modifiée à proximité immédiate des racines de l'olivier. L'effet du figuier sur les argiles semblerait moins évident. Toutefois, lorsque les argiles sont saturées au potassium, nous avons pu déterminer un effet espèce significatif sur la capacité des sols rhizosphériques des deux espèces à fixer le potassium. Le sol rhizosphérique du figuier fixe plus de potassium.

Les modifications des argiles dans la rhizosphère de l'olivier peuvent être d'ordre qualitatif (déplacement des pics) et/ou quantitatif (augmentation de l'abscisse des centres de gravité, de l'aire relative d'une ou plusieurs populations d'argiles). Cette évolution des argiles a pu se faire à une échelle spatiale très petite, mais aussi probablement à une échelle de temps relativement courte, celle de la durée de vie des racines actives.

Les relations quoique non significatives entre des propriétés du sol comme la CEC, le potassium non échangeable et certaines populations d'argiles comme I, PCI et S/I montrent que ces propriétés du sol pourraient être de bonnes indicatrices de la composition minéralogique de la fraction argileuse ces sols.

La mise en réserve du potassium dans les feuillets d'illite du sol rhizosphérique de l'olivier, contribue à limiter la déstabilisation de l'illite et l'évolution de minéraux potassiques comme l'illite vers de la smectite.

Afin de mieux statuer sur un possible impact différent de l'olivier et du figuier sur le cortège minéralogique de leur rhizosphère, il est nécessaire de mener une étude similaire au stade de la reprise végétative.

H-Conclusion générale

La culture de l'olivier occupe une place majeure dans l'agriculture de montagne de la Kabylie. L'oléiculture bénéficie actuellement d'un regain d'intérêt sur l'ensemble du territoire national.

Le potassium, élément nutritif majeur, délaissé ces dernières décennies, est un élément nutritif primordial pour la production oléicole, en particulier en climat méditerranéen. L'olivier prélève le potassium via la rhizosphère. Les racines des plantes peuvent exploiter le sol à leur proximité immédiate par divers processus physiques, chimiques et biologiques. Le rôle de ces processus devrait être de plus en plus pris en compte dans le déterminisme de la biodisponibilité des éléments nutritifs. En dépit de cela, les connaissances sur le fonctionnement de la rhizosphère et sur notre capacité à utiliser l'effet rhizosphérique dans l'objectif d'une production agricole de qualité à l'échelle de l'agro système sont limitées.

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 à la réalité du terrain. Ainsi, dans ce contexte nous avons choisi de travailler dans les conditions de terrain. La principale question que nous nous sommes posée et qui résume assez fidèlement la problématique de cette thèse est : La biodisponibilité du potassium est-elle modifiée dans la rhizosphère de l'olivier ?

Cette thèse est constituée de deux parties : dans la première, nous nous sommes exclusivement intéressés à l'olivier. Nous nous sommes placés dans un premier temps, à l'échelle de l'agro système afin d'étudier la nature et la magnitude de la modification de la biodisponibilité du potassium dans la rhizosphère de l'olivier. Cette dernière n'avait à notre connaissance jamais été étudiée. Cependant, il est reconnu pour certaines espèces annuelles et pérennes (maïs, sorgho, thé, essences forestières) une accumulation des formes bio- disponibles du potassium à proximité de la racine lorsque les études sont menées au champ. Pour appréhender cette question, nous avons échantillonné le sol global et le sol rhizosphérique de seize oliveraies de la variété Chemlal, contrastées par la nature du substrat géologique. Les résultats ont permis de mettre en évidence un enrichissement systématique des formes biodisponibles du potassium à l'interface sol-racine de l'olivier. Cet accroissement du potassium rhizosphérique fait que dans la majorité des cas, des sols considérés comme déficient en

potassium pour la culture de l'olivier lorsque l'analyse était réalisée sur le sol global, ne l'étaient plus lorsque l'analyse portait sur du sol rhizosphérique. La corrélation entre le potassium foliaire et le potassium rhizosphérique suggère que l'évaluation de la fertilité potassique avec des tests robustes comme l'extraction du potassium avec l'acétate d'ammonium gagnerait à être réalisée sur le sol rhizosphérique plutôt que sur le sol global.

Parallèlement au changement des formes biodisponibles du potassium dans la rhizosphère de l'olivier, des modifications chimiques significatives de certaines propriétés de la rhizosphère ont été mises en évidence. La teneur en matière organique du sol, la CEC sont plus élevées dans la rhizosphère. Le pH subit une acidification. Ces trois propriétés des sols sont fortement impliquées dans leur fertilité. Etant donné la forte implication de la minéralogie des argiles des sols dans la dynamique du potassium des sols, il nous fallait un outil d'étude des argiles qui nous permettent en plus de la qualification de la nature du cortège argileux, une quantification de différentes phases d'argiles dans la fraction inférieure à 2 μ . L'utilisation du logiciel Decomp (Moore et Reynold 1997) qui modélise différentes phases argileuses par décomposition des diffractogrammes des argiles nous a permis de quantifier cinq populations d'argiles (WCI, PCI, I/S, S/I et H/I) et de calculer l'abscisse du centre de gravité. La fixation du potassium révélée par l'accroissement du K_{rh} rhizosphérique est confirmée par l'augmentation de l'abscisse du centre de gravité.

Il est bien connu que les horizons supérieurs de sols sous arbres sont enrichis en éléments nutritifs par le jeu des cycles biogéochimiques. 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'agro système de l'olivier par la création d'îlots de fertilité autour de la racine.

En absence de fertilisation potassique, le potassium prélevé par les olives est exporté hors parcelle chaque année avec pour conséquence un appauvrissement progressif des sols en potassium. Ainsi, dans une seconde étape nous avons cherché à évaluer les effets d'apports croissants d'engrais potassiques appliqués en mode localisé sur les propriétés chimiques et minéralogiques de la rhizosphère.

Les résultats obtenus montrent sans surprise que l'application de doses croissantes de potassium associé à de l'engrais azoté et à de l'engrais phosphaté induit une acidification, une diminution des teneurs en carbone du sol et un accroissement des teneurs en potassium biodisponible des sols globaux. Ce qui est plus surprenant, c'est l'alcalinisation du rhizoplan

détectée et les teneurs en matière organique du rhizoplan qui s'élèvent lorsque les doses de potassium augmentent.

L'interaction engrais potassique/racine semble prévenir la chute de la teneur en matière organique des sols souvent mesurée dans les sols d'agriculture conventionnelle. De plus, l'activité de la racine de l'olivier modèrerait l'effet acidifiant dû à l'apport d'ammonitrate. Toutefois, des recherches ultérieures sont nécessaires pour évaluer dans quelle mesure la matière organique issue de la rhizodéposition est stabilisée dans les sols. Parallèlement, aux modifications du pH et de la teneur en matière organique, les racines de l'olivier ont induit des changements de la concentration des formes biodisponibles du potassium dans la rhizosphère. Nous avons déterminé deux tendances inverses de concentration en potassium du rhizoplan en relation avec le statut potassique du sol global. La magnitude de l'appauvrissement des formes biodisponibles du potassium à proximité immédiate de la racine était d'autant plus importante que le sol global était enrichi en potassium. Une stratégie de prospection racinaire radicalement différente a été proposée pour expliquer ce phénomène. La première, qui concerne les oliviers qui n'ont pas été fertilisés pourrait constituer une prospection racinaire, plutôt horizontale, à fortiori, d'un plus grand volume de sol, à la recherche des éléments nutritifs. Au contraire, la présence d'un patch enrichi en éléments nutritifs provoquerait la prolifération du système racinaire in situ. A cette étape de notre étude, apparaît une des limites majeurs de notre travail, c'est l'absence de la prise en compte de certaines caractéristiques (biomasse racinaire, biomasse des racines fines actives, longueur des racines, mycorhisation...) du système racinaire de l'olivier, lesquelles jouent un rôle majeur dans l'exploitation des potentialités des sols. Cependant, les investigations sur les racines en conditions naturelles sont longues et présentent de nombreuses difficultés. Ce volet pourrait constituer une perspective intéressante de recherche dans le futur.

Une fois que les propriétés chimiques et la biodisponibilité du potassium dans la rhizosphère ont été établies, la question suivante était de savoir si cet effet rhizosphérique s'étendait aux argiles des sols et in fine si ces dernières pouvaient constituer des indicateurs à la fois d'une pratique culturale (la fertilisation) et de l'activité de la racine.

L'application localisée d'engrais potassiques et d'ammonitrates induit une fixation du potassium mais aussi de l'ammonium par la fraction argileuse du sol global. Cette fixation est révélée par une illitisation des argiles du sol global. Dans un premier temps, on peut conclure que les argiles du sol global sont indicatrices d'un enrichissement en potassium du sol global. La

minéralogie des argiles du sol global confirme les mesures chimiques des formes biodisponibles du potassium.

Dans le même ordre d'idée, on devrait s'attendre à ce que l'appauvrissement des formes biodisponibles du potassium rhizosphérique des sols préalablement fertilisés avec des engrais potassiques apparaisse au niveau des argiles de la rhizosphère sous la forme d'une vermiculisation et/ou d'une smectitisation du rhizoplan.

Les résultats obtenus sont plutôt inattendus. L'activité de la racine ne modifie pas unilatéralement les argiles à l'interface sol-racine. Ainsi la racine de l'olivier induit des changements de la minéralogie de nature différente, en dépit, d'un statut initial minéralogique assez homogène du sol global, en l'occurrence une illitisation de la fraction argileuse révélée par les abscisses du centre de gravité des sols globaux inférieurs à celles du rhizoplan.

Nous avons ainsi déterminé qu'une partie de nos résultats (environ 50% des rhizoplans des arbres testés) présentent une illitisation des argiles du rhizoplan, alors que la seconde partie des argiles des rhizoplans montrent plutôt une smectitisation. Dans les deux cas, ces modifications de la minéralogie sont révélées par les valeurs des abscisses du centre de gravité. Ces résultats sont interprétés comme une conséquence probable de la forte alternance de l'olivier d'une année à une autre. L'intensité du prélèvement du potassium par l'arbre dépendrait du statut physiologique de l'olivier, en ON ou en OFF. Des recherches complémentaires sont nécessaires pour établir si la rhizosphère pourrait refléter un état phénologique de l'olivier au cours de son cycle végétatif. Pour ce faire, il est nécessaire de préciser l'état physiologique des oliviers et l'implication de celui-ci dans les processus à l'interface sol-racine.

Ces résultats suggèrent aussi que la fixation du potassium par les argiles du sol global est un phénomène réversible démontré par la diminution des teneurs en Kne des rhizoplans et par la smectitisation des argiles du rhizoplan. En tout cas, ce schéma général de remplissage du réservoir en potassium constitué par les feuillets d'illites du sol global et son vidage au niveau des argiles du rhizoplan, reste acceptable pour 50% des arbres testés. La réversibilité de la fixation du potassium étant établie pour environ 50% des arbres testés.

Les formes de potassium biodisponible semblent réagir de façon plus cohérente avec les doses croissantes d'engrais potassiques appliquées et le prélèvement racinaire. Ce qui semble être moins le cas de la minéralogie des sols.

Dans la seconde partie de la thèse, nous avons comparé l'effet rhizosphérique de l'olivier à celui du figuier, espèce fruitière largement distribuée à l'instar de l'olivier dans le Bassin Méditerranéen. Ces deux arbres fruitiers sont préférentiellement cultivés sur les sols à fertilité limitée. *Olea europea* L. et *Ficus carica* L. ont de façon similaire modifiée significativement certaines propriétés de leur rhizosphère. Un accroissement du carbone du sol, de la CEC et des formes biodisponibles du potassium a été mesuré à l'interface sol-racine des deux espèces. Cependant, nous n'avons pas mis en évidence une différence significative concernant les modifications des propriétés de leur rhizosphère au stade de repos hivernal. En dépit de cela, l'olivier semble avoir une activité racinaire plus intense que le figuier probablement due au maintien de ses feuilles et à sa biomasse racinaire plus élevée. Ces résultats suggèrent qu'à l'échelle de l'agro système, l'olivier impacte un volume du sol plus important que celui du figuier et contribuerait ainsi à une meilleure stabilité de l'écosystème.

Les résultats obtenus concernant l'impact de la racine de ces deux espèces sur la minéralogie de la fraction argileuse de la rhizosphère montrent que l'activité de la racine de l'olivier favorise une mise en réserve du potassium dans les argiles de la rhizosphère plus élevée comparé à celle du figuier.

Des recherches complémentaires sont nécessaires pour préciser l'effet rhizosphérique de ces deux espèces et cela à plusieurs stades phénologiques, en l'occurrence, la reprise de la végétation période d'intense activité considérable avec les intenses besoins en éléments majeurs NPK. 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 les plus aptes à mettre en œuvre les processus de la rhizosphère pour s'adapter à des milieux déficients et dans un contexte de faibles intrants constitue l'un des leviers de l'intensification écologique.

Tout au long de ce travail nous avons pu établir des relations étroites entre les propriétés chimiques, potassiques et minéralogiques des sols globaux et celle des sols rhizosphériques, ou rhizoplans. De plus nous, avons pu constater une relation étroite entre le potassium foliaire très utilisé pour diagnostiquer l'état nutritionnel potassique des cultures et le potassium assimilable de la rhizosphère.

Ces résultats peuvent déboucher sur un certain nombre de perspectives scientifiques comme la 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 rhizoplan.

Références bibliographiques

- Addiscott T.M. 1970.** The potassium Q/I relationships of soil given different K manuring, *Journ. Agric. Scien. Camb.* **74**, 131-137.
- 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.
- Alekseeva T., Alekseev A., Xu R.K., Zhao A.Z., Kalinin P. 2011.** Effect of soil acidification induced by a tea plantation on chemical and mineralogical properties of Alfisols in eastern China. *Environmental Geochemistry and Health* **33**,137-148.
- Alexis M. 1988.** Nutrition minéral relation sol-plante. Ed .Lavoisier, Paris. V, 320p.
- Almi Y., Champolivier L., Merrien A., Heulin T. 2002.** Rôle de rhizobium sp, rhizobacterie productrice d'expolysaccharides dans l'agrégation du sol rhizosphérique du tournesol : conséquence sur la croissance de la plante et la résistance de la plante à la contrainte hydrique. *C.C.L.* **6**,524-528.
- Andréoli C. 1989** Evolution des phyllosilicates 2/1 en fonction de la dynamique du potassium. Thèse Doctorat Université Paris VI. 232p.
- April R., Keller D. 1990.** Mineralogy of the rhizosphere in forest soils of the eastern United States. *Biogeochemistry* **9**, 1–18.
- Aquaye D.K. 1973.** factors determining the potassium supplying power of soil in Ghana. *Proc. 10th colloquium of the int. Potash institute. ABIDJAN/Republic of Ivory coast*, 51-69.
- Argenson C., Regis S., Jourdain J.M., Vays P. 1999.** Centre technique Interprofessionnel des fruits et légumes (CTIFL). In: *L'olivier* (Ed. Maison neuve) 204p.
- Arocena JM., Glowa KR. 2000.** Mineral weathering in ectomycorrhizosphere of subalpine fir (*Abies lasiocarpa*(Hook.) Nutt.) as revealed by soil solution composition. *Forest Ecology and Management* **133**, 61-70.
- 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., Benloch 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)*.
- Augusto L., Turpault M.P., Ranger J., 2000.** Impact of forest tree species on feldspar weathering rates. *Geoderma* **96**, 215–237.
- Augusto L., Ranger J., Turpault M.P., Bonnaud P. 2001.** Experimental in situ transformation of vermiculites to study the weathering impact of tree species on the soil. *Eur. J. Soil Sci.* **52**, 81-92.
- Augusto L., Ranger J., Binkley D., Rothe A. 2002.** Impact of several common tree species of European temperate forests on soil fertility- *Annals of Forest Science - afs-journal.org*.
- 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.

- Badraoui M., Bloom P.R., Delmake A. 1992.** Mobilization of Non exchangeable K by Rye grass in five Morocco soils without mica. *Plant and Soil* **140**, 55-63.
- 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., Gaussen H. 1953.** Saison sèche et indice xéothermique, *Sol Hist. Nat. Toulouse*, 88-193.
- Baize D., 2000.** Guide des analyses courantes en pédologie ; Ed. Lavoisier, Paris, 172p.
- Bajwa M.I. 1989.** Potassium mineralogy of Pakistani soils and its effect on potassium response. Potassium and fertilizer use efficiency, 203-219.
- Bakker M., George E., Turpault M.P., Zhang J.L., Zeller B. 2004.** Impact of Douglas-fir and Scots pine seedlings on plagioclase weathering under acidic conditions. *Plant and Soil* **266**, 247-259.
- Baldy C. 1990.** Le climat de l'olivier (*Olea europea* L.). *Ecologia Mediterranea* XVI, 113-121.
- Balesdent J., Balabane M. 1996.** Major contribution of roots to soil carbon storage inferred from maize cultivated soils storage inferred from maize cultivated soil. *Soil Biology and Biochemistry* **28**, 1261-1263.
- Barber S.A. 1974.** Influence of the plant root on ion movement in soil. In *The plant root and its environment* E.W. Carson Ed. Univ. Press Virginia, Charlottesville. 691p.
- Barber S A. 1995** Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach 2nd Ed. Wiley. New York.p.414.
- Barbier G. 1962** La dynamique du potassium dans le sol. *Potassium Symposium* **55**, 233-255.
- Barré P. 2007.** Interaction plantes-minéraux argileux dans une perspective écologique. Thèse de doctorat en écologie, Science de la terre UPMC.122p.
- Barré P., Velde B., Abbadie L. 2007a** Dynamic role of illite-like clay minerals in temperate soils: facts and hypothesis. *Biogeochemistry* **82**: 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* **292**,137-146.
- Barré P., Velde B., Fontaine C., Catel N., Abbadie L. 2008.** Which 2:1 clay minerals are involved in the soil potassium reservoir? Insights from potassium addition or removal experiments on three temperate grassland soil clay assemblages. *Geoderma* **146**, 216- 223
- Barré P., Berger G., Velde B. 2009.** How element translocation by plants may stabilize illitic clays in the surface of temperate soils. *Geoderma* **151**, 22-30.
- 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 Doctorat. I.N.P.L.176p.
- Beckett PH. 1963.** Equilibres d'échange potassium-calcium dans le sol. Sites d'échanges du potassium. *Revue de la potasse* section 4 *Science du sol* **33^{ème}** suite, 1-13.
- Becket P. 1980.** Le potassium fixé et les effets résiduels des engrais potassiques. *Revue de la potasse. Section 16.* 52^{ème} suite. I.I.P. Berne, 1-13.
- Benipal D.S., Pasricha N.S. 2002.** Non exchangeable K release and supplying power of Indo-Gangetic alluvial soils *Geoderma* **108**,197-206.
- 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'oliviers en conditions d'agriculture pluviale. Nouvelles prospectives. Sfax, Tunisie. pp1-15.
- Binkley D. 1995.** The influence of tree species on forest soils: Process and Patterns. In: Mead DJ, Cornforth IS (eds) Proceeding of the trees and soil workshop. Agronomy Society of New Zealand Special Publication, Lincoln University, Canterbury, 1–33.
- Boudiaf N.K. M., Mouas B. S., Sadoun S. 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.
- Bonneau M., Souchier B. 1994.** Pédologie 2 : constituants et propriétés du sol ; 2^{ème} édition. Ed. Masson, 665p.
- Bonkowski M., Chengb W., Griffiths B. S., Alpei J., Scheu S. 2000.** Microbial-faunal interactions in the rhizosphere and effects on plant growth. Eur. J. Soil Biol. **36**, 135-147.
- Bosc M. 1988.** Enseignements fournis par des essais de longues durées sur la fumure phosphatée et potassique. Phosphore et potassium dans les relations sol-plante : conséquences sur la fertilisation, 403-466.
- 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.
- Boulila M. 2001.** Maladies de l'olivier en Tunisie : connaissances actuelles. Olivae, n° **87**, 22-25.
- Braham M. 1999.** Evaluation des exportations en azote, phosphate et potassium d'un hectare d'oliviers (Chemlali) (*Olea europea* L.). Revue Ezzaitouna 5 (1 et 2). 29 p.
- Bretauudeau J., Faure Y. 1991.** Atlas d'Arboriculture fruitière. Vol°.IV. 3eme Ed. Tec et Donc. Lavoisier. Paris, 227-243.
- Bukman O., Kaarstado L., Richard S. 1990.** Agriculture et fertilisation : les engrais, leur avenir. Ed. division de l'agriculture, Norskhydro, Oslo, Norvège. 258p.
- Caillère S., Henin S. Rautureau M. 1982.** Minéralogie des argiles, structure et propriétés physico-chimiques. Ed. Masson, 4-16.
- Cakmak I. 2007.** Role of potassium in alleviating abiotic stress. Proceeding 611 in the International Fertiliser Society. Cambridge, 2-19.
- Cakmak I. 2010.** Potassium for better crop production and quality. Plant and Soil **335**, 1-2.
- 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., Mareschal L., Turpault M.P. 2007.** Rapid clay weathering in the rhizosphere of Norway spruce and oak in an acid forest ecosystem. Vol. **73** No. 1, 331-338.
- 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. On Line
- Calvet R. 2003.** Le sol propriétés et fonctions. T2 : Phénomènes physiques et chimiques. Ed. France Agricul., 511p.

- Caravaca F., Figueroa D., Roldan A. 2003.** Alteration in rhizosphere soil properties of afforested *Rhamnus lycoides* seedlings in short term response to mycorrhizal inoculation with *Glomus intraradices* and organic amendment. *Environmental Management* 31, No.33, 412-420.
- 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.
- Chaves, M.S. 1975.** Caractéristiques des sols et fertilisation de l'olivier. 2^{ème} Séminaire Oleicole International. Cordoue, 58 - 64.
- Chen X.L., Han S.J., Shi X.M. 2001.** Nutrient characteristics in rhizosphere of pure and mixed plantation of Manchurian walnut and Dahurian larch. *Journal of forestry research* 12(1), 18-20.
- 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.
- Civantos L. 1998.** L'olivier, l'huile d'olive et l'olive. Ed. Conseil Oléicole International. 130p.
- Chiu, C.Y., Wang, M.K., Hwong, J.L., King, H.B. 2002.** Physical and chemical properties in rhizosphere and bulk soils of *Tsuga* and *Yushania* in a temperate rain forest. *Comm. Soil Sci. Plant Nutr.* **33**, 1723-1735.
- Classen N., Trehan PS. 1998.** Chemical mobilization of K by plants as revealed by measurements and calculations. Symp. N°43. 16^e Congrès Mondial des Sciences du Sol de Montpellier. France. p:7.
- Clegg S., Gobran GR. 1997.** Rhizospheric P and K in forest soil manipulated with ammonium sulfate and water. *Can J Soil Sci.* **77**, 525-533.
- Colin-Belgrand M., Dambrine E., Bienaime S., Nys C., Turpault M.P. 2003.** Influence of tree roots on Nitrogen mineralization. *Scand. J. For. Res.* 18: 260-268.
- Courchesne F, Gobran GR. 1997.** Mineralogical variation of bulk and rhizosphere soils from a Norway spruce stand. *Soil Sci Soc Am J* **61**, 1245-1249.
- Courchesne F., Seguin V., Dufresne A., 2001.** Solid phase fractionation of metals in the rhizosphere of forest soils. In : Gobran G.R., Wenzel W.W. et Lombi E. (eds.). Trace elements in the rhizosphere, CRC Press, Boca Raton, 189-206.
- Craine J.M., Wedin D.A., Chapin F.S., Reich P.B., 2002.** Relationships between the structure of root systems and resource use for North American grassland plants, *Plant Ecology* **165**, 85-100.
- Darrah PR. 1993.** The rhizosphere and plant nutrition: a quantitative approach. *Plant and soil* **155/156**, 1-20.
- Darrah PR., 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., Jones D.L., Kirk. G.J.D et 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 végétale. Ed I.N.R.A., 344 p.
- De Cheng Li., Velde B., Li F.M., Zhang G.L., Zhao M.S., Huang L.M. 2011.** Impact of Long-Term Alfalfa Cropping on Soil Potassium Content and Clay Minerals in a Semi-Arid Loess Soil in China. *Pedosphere* **21(4)**, 522-531.
- De Neergaard et Magid D. 2001.** Influence of the rhizosphere on the microbial biomass and recently formed organic matter. *European Journal of Soil Science* **52**, 377-384.

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 J.F. 2000. La fertilisation de l'olivier. *Le nouvel olivier* n°17, 3-12.

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.

Dommergues Y., Mangenot F. 1980. *Ecologie microbienne du sol*. Ed. Masson. 280p.

Douglass F., Jacob S., Timmer V.I.C. R. 2005. Fertilizer-induced changes in rhizosphere electrical conductivity: relation to forest tree seedling root system growth and function. *New Forests* **30**, 147-166.

Doussan C., Pages L., Pierret A. 2003. Soil exploration and resource acquisition by plant roots: an architectural and modelling point of view. *Agronomie* **23**, 419-431.

Doussan C., Pierret A., Garrigues E., Pages L. 2006. Water uptake 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 and Soil* **283**, 99-117.

Drew M.C. 1975. Comparison of the effects of a localized supply of phosphate, nitrate, ammonium and potassium on the growth of the seminal root system and the shoot in barley. *New Phytol* **75**, 479-490.

Dufey JE., Lambert J. 1987. Fixation du potassium dans quatre sols du sud de la Wallonie, Belgique, *Pédologie* **3**, 241-258.

Eissenstat DM., Volder A. 2005. The Efficiency of Nutrient Acquisition over the Life of Root. *Ecological Studies*, Vol. 181 H. Bassiri-Dad (Ed.) *Nutrient Acquisition by Plants An Ecological Perspectives*, 185-220.

Evangelou VP., Blevins RL. 1988. Effect of long-term tillage systems and nitrogen addition on potassium quantity relationships. *Soil Sci Soc Am J.* **55**, 1047-1054.

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).

Fernandez J.E., Moreno F., 1999. Water use by the olive tree. *J. Crop Prod.* **2**, 101-162.

Fernandez-Escobar R., Moreno R., Garcõâa-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.

Fernández-Escobar R., Moreno R., Sánchez-Zamora, M.A. 2004. Nitrogen dynamics in the olive bearing shoot. *Hort Science* **39**, 1406-1411.

Fernandez-Escobar R. 2004. Fertilizacion. In: Barranco, D., Rallo, L. Eds. *El cultivo del olivo*. Mundi-Prensa. Madrid, 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.

Ferrah A. 2009. Les figues d'Algérie : Un patrimoine génétique à considérer (<http://www.gredaal.com>).

Finlay R.D 1992 Uptake and mycelial translocation of nutrient by ectomycorrhizal fungi in Mycorrhizas in ecosystems, eds, CAB International, Wallingfort, UK, p. 91-97.

Finlay R.D. 1995. Interaction between soil acidification plant growth and nutrient uptake in ectomycorrhizal associations of forest trees. *Ecol. Bull.* **44**, 197-214.

- Ford B., Lorenzo H. 2001.** The nutritional control of root development. *Plant and Soil* **232**, 51-68.
- Freeman M., Carlson RM. 1994.** Mineral Nutrient Availability. In: Olive Production Manual, Ferguson et al., eds. Publication **3353**. University of California, 69-75.
- Frey-Klett P., Calvaruso C., Satrani B., Ray P., Amellal N., Lapeyrie F., Garbaye J., Turpault MP. 1999.** Les bactéries jouent-elles un rôle dans l'altération des minéraux ? Ed. INRA.
- Gahoonia T.S., Classen N., Jungk A. 1992.** Mobilization of phosphate in different soil by ryegrass supported with ammonium or nitrate J. *Plant and soil*, 241-248.
- 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., Mhiri A. 2002.** Relationship between soil fertility. Phosphorus and Potassium nutrition of the olive groves in Tunisia. *Option méditerranéennes Series A50*, 199-204.
- 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.
- Gaultier JP., Mamy J. 1979.** Evolution of Exchange Properties and Crystallographic Characteristics of Biionic Montmorillonite Submitted to Alternate Wetting and Drying . *Developments in Sedimentology* **27**, 167-175.
- Ghosh B.N., Singh R.D. 2001** Potassium release characteristics of some soils of Uttar Pradesh hills varying in altitude and their relationship with forms of soil K and clay mineralogy. *Geoderma* **104**, 135-144.
- 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., Matthey W. 2010.** Le sol vivant. Ed. Lausanne. 522p.
- Gobran G., Clegg S. 1996.** A conceptual model for nutrient availability in the mineral soil root system. *Can J. Soil Sci.* **76**, 125-135.
- Gobran G., Clegg S., Courchesne F. 1998.** Rhizospheric processes influencing the biogeochemistry of forest ecosystems. *Biogeochemistry* **42**, 107-120.
- Goulding K.W.T. 1983.** Thermodynamics and potassium exchange in soils and clays minerals. *Adv. in Agron.* **136**, 215-264
- Goulding K.W.T. 1987.** Potassium fixation and release in: *Methodology in soil potassium research*, 20th collo. Of I.P.I., 125-141.
- Grayston SJ., Vaughan D. and Jones D. 1996.** 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.
- Gregory P.J., 2006.** Roots, rhizosphere and soils : the roots to a better understanding of soil science ? *European Journal of Soil Science* **57**, 2-12.
- 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.
- Grinsted M.J., Hedley M.J., White R.E., Nye P.H. 1982.** Plant induced changes in the rhizosphere of rape (*Brassica napus* var. Emerald) seedlings. 1. pH changes and the increase in P concentration in the soil solution. *New Phytol.* **91**, 19-29.
- Harley A. D., Gilkes R. J. 2000.** Factors influencing the release of plant nutrient elements from silicate rock powders: A geochemical overview. *Nutr. Cycling. Agroecosyst.* **56**, 11-36.
- Hartmann H.T., Uriu K., Lilleland O. 1966.** Olive nutrition. Fruit nutrition. Childers Ed. New Brunswick, N.J. Horticultural Publication. Chapter X, 252-268.

- He Y., Li D.C., Velde B., Yang Y.F., Huang C.M., Gong Z.T. 2008.** Clay minerals in a soil chronosequence derived from basalt on Hainan Island China and its implication for pedogenesis. *Geoderma* **48(2)**, 206-212.
- Heller R., Esnault R., Lance C. 1998** *Physiologie végétal : Nutrition*. 5^{ème} Ed. Dunod, Paris, 323 p.
- Hinsinger P., Jaillard B., Dufey E.D. 1992.** Rapid weathering of a trioctahedral mica by the roots of ryegrass. *Soil Sci Soc Am J.* **56**, 977-982.
- 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., Gregory P.J. 1998.** Structure and function of the rhizosphere : mecanismes at the soil-root interface. *Synthesis. Symp. n° 43, 16^{ème} Congrès Mondial des Sciences du Sol de Montpellier (France)*. 6p.
- Hinsinger P. 1998.** How do plant root acquire mineral nutrients? Chemical process involved in the rhizosphere. *Advance in agronomy* **64**, 225-265.
- Hinsinger P. 2001.** Bioavailability of trace elements as related to root-induced chemical changes in the rhizosphere. In *trace element in the rhizosphere* (G.R. Gobran, W.W. Wenzel and E. lombi Eds.) CRC Press LCC, Boca Raton, USA, 25-41.
- Hinsinger P., Fernandez Barros O N., Benedetti M F., Noack Y., Callot G. 2001.** Plant-induced weathering of a basaltic rock: an experimental evidence. *Geochim. Cosmochim. Acta* **65**, 137-152.
- Hinsinger P., Plassard C., Tang C., Jaillard B. 2003.** Origins of root-mediated pH changes in the rhizosphere and their response to environmental constraints. *Plant and soil* **248**, 43-59.
- Hinsinger P., Gobran G.R., Gregory P.J., Wenzel W. 2005.** Rhizosphere geometry and heterogeneity arising from root-mediated physical and chemical process. *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.
- Hodge A. 2004.** The plastic plant: root responses to heterogeneous supplies of nutrients. *New Phytologist* **162**, 9-24.
- Hodge A., Berta G., Doussan C., Merchan F., Crespi M. 2009.** Plant root growth, architecture and function. *Plant Soil* **321**, 153-187.
- 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.
- Husson O. 2012.** Potentiel rédox (Eh) et pH, un cadre global de fonctionnement des systèmes sol/eau/plantes/microorganismes. [Htt:// www.agropolis.fr/agronomie/ animation-scientifique –agroecologie.php](http://www.agropolis.fr/agronomie/animation-scientifique-agroecologie.php).
- Hylander LD., Ae N., Hatta T., Sugiyama M. 1999.** Exploitation of K near roots of cotton, maize, upland rice, and soybean grown in an Ultisol. *Plant and Soil* **208**, 33-41.
- Inal A., Gunes A., Zhang F., Cakmak I. 2007.** Peanut/maize intercropping induced changes in rhizosphere and nutrient concentrations in shoots. *Plant Physiology and Biochemistry* **45**, 350-356.
- Jackson P.C., Adams H.R. 1963.** Potassium and Sodium absorption by Barley Root *The Journal of General Physiology* **46**, 369-386.
- Jackson M.L. 1967.** *Soil Chemical Analysis*. Asia publishing House, Bombay, India.

Jacob M., Ficheur M. 1911. Carte géologique et topographique n° 66, éch.1/500 00. Ed., Service Géologique de l'Algérie. Alger.

Jalali VK 2010. Multivariate Statistical Analysis of Potassium Status in Agricultural Soils in Hamadan, Western Iran. *2 Pedosphere* **20(3)**, 293-303.

Jaillard B., Schneider A., Mollier A., Pellerin S. 2000. Modelling the mineral uptake by plants based on the bio-physical-chemical functioning of the rhizosphere. In *Fonctionnement des Peuplements Végétaux Sous Contraintes Environnementales*. Eds P Maillard and R Bonhomme. INRA, Paris (France), 253-287.

Jing J., Rui Y., Zhang F., Rengel Z., Shen J. 2010. Localised application of phosphorus and ammonium improves growth of maize seedlings by stimulating root proliferation and rhizosphere acidification. *Field Crops Research* **119**, 355-364.

Johansson G. 1992. Below-ground carbon distribution in barley (*Hordeum vulgare* L.) with and without nitrogen fertilisation. *Plant and Soil* **144**, 93-99.

Jones DL., Darrah PR. 1994. Role of root derived organic acids in the mobilisation of nutrients from the rhizosphere, Vol. **166**, N. 2, 247-257.

Jones D.L., 1998. Organic acids in the rhizosphère – A critical review. *Plant and soil* (**205**), 25-44.

Jones DL., 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.

Jordan-Meille L. 2011. Besoin de recherche sur la nutrition potassique des plantes. <http://www.Comifer.asso.fr/image/stories/pdf/10^{ème}rencontres>.

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 Frago MAC and van Beusichem ML, 313-318.

Jungk A., Classen N. 1986. Availability of phosphate and potassium as the result of interaction between root and soil in the rhizosphere. *J. Plant nut.soil Sci.* **149**, 411-427

Khademi H., Arocena JM. 2008. Kaolinite formation from palygorskite and sepiolite in rhizosphere soils *Clays and Clay Minerals* **56(4)**, 429-436.

Kozlowski T.T. 1987. Soil moisture and absorption of water by tree roots. *J. Arboric.* **13**, 39-46.

Kuzyakov Y., Domanski G. 2000. Model for rhizodeposition and CO₂ efflux from planted soils and its validation by C14 pulse labelling of ryegrass. *Plant and Soil* **239** (1), 87-102.

Kuzyakov Y., Hill P.W., Jones D.L. 2007. Root exudates components decomposition in a simulated rhizosphere depending on temperature. *Plant Soil* **290**, 293-305

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.

Leyval C., Berthelin J. 1993. Rhizodeposition and net release of soluble organic compounds by pine and beech seedlings inoculated with rhizobacteria and ectomycorrhizal fungi. *Biol. Fertil. Soils* **15**, 259-267.

Li X., Lu J., Wu L., Chen F. 2009 The difference of potassium dynamics between yellowish red soil and yellow cinnamon soil under rape seed (*Brassica napus* L.)–rice (*Oryza sativa* L.) rotation. *Plant Soil* **320**, 141-151.

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**. 209p.

- Loussert R ; Brousse G. 1978.** L'olivier. G.P. Maison neuve Larose, 167-175.
- Lynch J.M., Whipps J.M. 1990.** Substrate flow in the rhizosphere. *Plant and Soil* **129** (1), 1-10.
- Ma B, Zhou Z.-Y., Zhang C.P., Zhang G., Hu Y.J. 2009.** Inorganic phosphorus fractions in the rhizosphere of xerophytic shrubs in the Alxa Desert. *Journal of Arid Environments*. Vol. **73**(1), 55-61.
- 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.
- Maillard R. 1975.** L'olivier. Ed. Maison des Agriculteurs. Paris (France). 147p.
- 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**, 1777-1782.
- Mamy J., Gaultier J.P. 1974.** Réarrangement structural de la montmorillonite potassique associé à la diminution d'échangeabilité du potassium. *CR. Acad. Sc. Paris* **278**, 3153-3155.
- Marschner, H. 1995.** Mineral Nutrition of Higher Plant, 2nd ed. Academic Press, San Diego. 889p.
- Marschner H. 1998.** Role of root growth, arbuscular mycorrhiza, and root exudates for the efficiency in nutrient acquisition. *Fields Crops Research* **56**, 203-207.
- Marschner P., Solaimana Z., Zed Rengel Z. 2007.** Brassica genotypes differ in growth, phosphorus uptake and rhizosphere properties under P-limiting conditions. *Soil Biology & Biochemistry* **39**, 87-98.
- Marschner P., Timonen S. 2006.** Bacterial Community Composition and Activity in Rhizosphere of Roots Colonized by Arbuscular Mycorrhizal Fungi. *Soil Biology*, Vol. 7. 139-153.
- Marschner P., Rengel Z. 2007.** Contributions of Rhizosphere Interactions to Soil Biological Fertility. L.K. Abbott & D.V. Murphy (eds) *Soil Biological Fertility - A Key to Sustainable Land Use in Agriculture*, 81-98.
- Martinez R.L., Sanchez C.M. 1975.** Fertilisation II. Séminaire oléicole international 6-17 octobre. Cordoue (Espagne), 48-46.
- 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.
- McGrath DA., Duryea ML., Cropper WP. 2001.** Soil phosphorus availability and fine root proliferation in Amazonian agroforests 6 years following forest conversion. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **83**, 271-284.
- Memon Y.M., FergusI.F., Hughes J.D., PageW.D. 1988** Utilization of Non exchangeable Soil potassium in Relation to Soil Types, Plants species and Stage growth. *Aus. J. Soil. Res.* **26**, 489-496.
- Mengel K. 1985.** Dynamics and availability of major nutrients in soils. *Adv. In soil sci.* vol. **2**, 65-115.
- Mengel K., Uhlenbecker K. 1993.** Determination of available interlayer potassium and its uptake by rye grass. *Soil Sci.Soc. Am. J.* (5-7), 761-766.
- Molina J.A.E., Clapp C.E., Linden D.R., Allmaras R.R., Layese M.F., Dowdy R.H., Cheng H.H. 2001.** Modeling the incorporation of corn (*Zea mays* L.) carbon from roots and rhizodeposition into soil organic matter. *Soil Biology & Biochemistry* **33**, 83-92.
- 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.
- Moore D.E., Reynolds R.C. 1997.** X-ray Diffraction and the Identification of Clay Minerals. 2nd edition, Oxford University Press, New-York,USA, 378 p.
- Morel R. 1989.** Les sols cultivés, Ed. Lavoisier, Paris, 389 p.

Moritsuka N., Yanai J., Kosaki T., 2004 Possible processes releasing non exchangeable potassium from the rhizosphere of maize. *Plant and Soil* **258**, 261-268.

Nguyen C., Henry F. 2002. A carbon-14 glucose assay to compare microbial activity between rhizosphere samples. *Biology and Fertility of Soils* **35**, 270-276.

Nguyen C. 2009. Rhizodeposition of Organic C by Plant: Mechanisms and controls. *Sustainable Agriculture, Part 1*, 97-123.

Niebes J.E. Dufey E.J., 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 and Khademi H. 2010. Ability of alfalfa (*Medicago sativa* L.) to take up potassium. *Plant and Soil* **328**, 83-93.

Nursyamsi D., Idris K., Sabiham S., Rachim D.A., Sofyan A. 2008. Dominant soil characteristics influencing available potassium on smectitic soils. *Indonesian Journal of Agriculture* 1 (2), 121-131.

Officer S.J., Tillman R.W., Palmer A.S., Whitton J.S., 2006. Variability of clay mineralogy in two New Zealand steep-land topsoils under pasture. *Geoderma* **132**, 427-440.

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.

Pal DK., Durge SL. 1989. Release and adsorption of potassium in some Benchmark alluvial soils of India in relation to their mineralogy. 14 th Collo I.I.P,165: 185.

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.

Paris F., Botton B., Lapeyrie F. 1996. In vitro weathering of phlogopite by ectomycorrhizal fungi. II Effect of K⁺ and Mg⁺ deficiency and N sources on accumulation of oxalate and H⁺. *Plant and Soil* **179**, 141- 150.

Pernes-Debuysier A., Pernes M., Velde B., Tessier D. 2003. Soil mineralogy evolution in the INRA 42 Plots experiment (Versailles, France). *Clays and Clay Minerals*, 51, 578-585.

Pettigrew W, 2007. Potassium influence on crop yield and quality. Proceeding 614 in the International Fertiliser Society. Cambridge, 2-19.

Quemener, J., 1979. The measurement of soil potassium. IPI. Research topics N° 4. Ed. International Potash Institute, Bern/Switzerland. 48p.

Quemener J. 1986. Important factors in potassium balance sheets. *Nutrient Balance and the Need for Potassium*. 13th Cong. Int. Potash. Bern Switzerland, 33-63.

Ramirez Rodriguez V., Lopez Bucio J., Herrera-Estrella L. 2005. Adaptive responses in plants to non optimal pH. *Plant abiotic system*, 145-170.

Raynauds X. 2010. Soil properties are key determinants for the development of exudates gradients in a rhizosphere simulation mode. *Soil Biology & Biochemistry* **42**, 210-219.

Raynold D. 1976. Evolution sédimentaire et tectonique du Nord-ouest de la grande Kabylie (Algérie) au cours du cycle Alpin. Thèse de doctorat d'état. Université Pierre et Marie Curie. Paris **6**, 152p.

Read D., Gregory P.J. 1998. The influence of root mucilages on the physical properties of the rhizosphere. Symp. n° 43, 16^{ème} Congrès Mondial des Sciences du Sol de Montpellier (France).

Recalde L. 1975. Fertilisation. IIème Sem. Olei. Inter. Cordoue , 43 - 64.

Rees R.M., Bingham I.J., Baddeley J.A., Watso C.A. 2005. The role of plants and land management in sequestering soil carbon in temperate arable and grassland ecosystems. *Geoderma* **128**, 130-154.

Rengel Z., Marschner P. 2005. Nutrient availability and management in the rhizosphere: exploiting genotypic differences. *New Phytologist* **168**, 305-312.

Restrepo-Diaz H., Benlloch M., Navarro C., Fernandez-Escobar R. 2008a. Potassium fertilization of rainfed olive orchards *Scientia Horticulturae* **116**, 399-403.

Restrepo-Diaz H., Benlloch M., Fernandez-Escobar R. 2008b. Plant water stress and K⁺ starvation reduce absorption of foliar applied K⁺ by olive leaves. *Scientia Horticulturae* **116**, 409-413.

Rezapour S., Jafarzadeh A.A., Samadi A., Oustan S. 2009. Impacts of clay mineralogy and physiographic units on the distribution of potassium forms in calcareous soils in Iran. *Clay Minerals* **44(3)**, 327-337.

Righi D., Velde B., Meunier A. 1995. Clay stability in clay dominated soil systems. *Clay Minerals* **30**, 45-54.

Robert M., Tessier D. 1974. Méthodes de préparation des argiles des sols pour étude minéralogique. *Ann. Agro.* **25(6)**, 859-882.

Robert M., Trocmé S. 1979. Le potassium. In *Pédologie. Constituants et propriétés du sol*. Ed. Masson, 539-565.

Robert M., Berthelin J. 1986. Role of biological and chemical factors in soil mineral weathering. In *Interaction of soil minerals with natural organics and microbes*, PM. Huang and M. Schnitzer Eds. Soil Society of America, Madison, Wisconsin, U.S.A., 453-495.

Robert M., Guyot J., Hervion M., 1988. Minéralogie des sols et dynamique du potassium in *Phosphore et Potassium dans les relations sol-plante. Conséquences sur la fertilisation*. Ed. INRA **566**, 13-31.

Robert M. 1992. K fluxes in soils in relation to parent material and pedogenesis in tropical temperate and arid climates. 23rd Collo. of IPI, 25-44.

Robert M. 1996. Le sol interface dans l'environnement. Ed. Masson. Paris, 134p.

Robinson D. 1994. The responses of plants to non-uniform supplies of nutrients. *New Phytologist* **127**:635-674.

Robinson D. 1996. Variation, co-ordination and compensation in root system in relation to soil variability. *Plant and soil* **187**: 57.

Robinson D. 2001. Root proliferation, nitrate in flow and their carbon costs during nitrogen capture by competing plants in patchy soil. *Plant and Soil* **232**, 41-50.

Rodrigues MA., Lopes JI., Pavao FM., Cabanas JE., 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.

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.

Romheld V., Kirkby E.A. 2010. Research on potassium in agriculture: needs and prospects. *Plant and soil* **335**, 155-180.

Ryan P.R., Dessaux Y., Thomashow L.S., Weller D.M. 2009. Rhizosphere engineering and management for sustainable agriculture. *Plant Soil* **321**, 363-383.

Rosenstock N.P. 2009. Can ectomycorrhizal weathering activity respond to host nutrient demands? *Fungal biology reviews* **23**, 107-114.

Rosentock TS., Uriel RA., Plant RE., Brown PH. 2010. A reevaluation of alternate bearing in pistachio. *Scientia Horticulturae* **124**, 149-152.

Rovira AD. 1969. Plant root exudate. *Botany Revue* **35**, 35-57.

Sahu S., Gupta S.K. 1987. Fixation and release of potassium in some alluvial soils. *J. Indian Soc. Soils Sci.* Vol: **35**, 29-34.

Séguin V, Gagnon C, Courchesne F. 2004. Changes in water extractable metals, pH and organic carbon concentrations at the soil–root interface of forested soils. *Plant and Soil* **260**, 1-17.

Schöttelndreier M., Falkengren-Grerup U. 1999. Plant induced alteration in the rhizosphere and the utilisation of soil heterogeneity. *Plant and Soil* **209**, 297-309.

Schröder P., Hartmann A. 2003. Global Soils: New Developments in Rhizosphere Research. *J. Soils & Sediments* **3** (4). 227p.

Schubert, S., Schubert E., Mengel K. 1990. Effect of low pH of the root medium on proton release, growth, and nutrient uptake of field beans (*Vicia faba*). *Plant and Soil* **124**, 239-244.

Schuffellen A.C., Van der Marel H.W. 1955. Potassium fixation in soils, proc. 3 rd Cong. IIP Bern., 157-201.

Sharma A., Jalali V.K., Arora S. 2010. Non-exchangeable potassium release and its removal in foot-hill soils of North-west Himalayas. *Catena* **82**, 112–117.

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.

Sibbett GS., Ferguson L. 2002. Nitrogen, Boron and Potassium Dynamic in "On" vs "Off" Cropped Manzanillo Olive Trees in California USA. Proc. 4th IS on Olive Growing, *Acta Hort.* **586**, 369-373.

Singh B., Goulding KWT. 1997. Changes with time in the potassium content and phyllosilicates in the soil of the Broadbalk continuous wheat experiment at Rothamsted. *Eur.J.SoilSci.* **48**, 651-659.

Smith WH .1976. Character and significance of forest tree root exudates ; *Ecology V.* **57** pp 324-331.

Sopib, 2009 : Le sulfate de potassium et la production d'olive. 1p. ([www. Tessengerlogroup.com](http://www.Tessengerlogroup.com)).

Soyergin S., Moltay I., Genc C., Fidan A.E., Sutcu A.R. 2002. Nutrient Status of Olives Grown in the Marmara Region. *Acta Hort.* **586**, 375-379.

Stengel P., Gellin S. 1998. Le sol interface fragile. Collection mieux comprendre. INRA. 213 p.

Ström L. 1997. Root exudation of organic acids: importance to nutrient availability and the calcifuges behaviour of plants. *Ed. Oikos* (**80**), 459-466.

Ström L., Andrew G.O., Douglas L., Godbold D.L., Jones D.L. 2002. Organic acid mediated P mobilization in the rhizosphere and uptake by maize roots. *Soil Biology and Biochemistry.* Vol.**34**, 703-710.

Ström L., Owen A.G., Godbold D.L., Jones D.L. 2005. Organic acid behaviour in a calcareous soil soil implications for rhizosphère nutrient cycling. *Soil biochemistry* **37**, 2046-2054.

Surapaneni A., Palmer A.S., Tillman R.W., Kirkman J.H., Gregg P.E.H. 2002. The mineralogy and potassium supplying power of some loessial and related soils of New Zealand *Geoderma* **110**, 191-204.

Swinnen, J., Van Veen J.A., Merckx R. 1995. Carbone fluxes in the rhizosphere of winter wheat and spring barley with conventional vs integrated farming. *Soil Soil. Biochem.* **27** (6), 811-820.

Tournis V., Rabinovitch M. 2010. Les ressources naturelles pour la fabrication des engrais : une introduction. Eco-notes du BRGM extraites de la revue mensuelle ecomine. [Hwww.mineralinfo.org](http://www.mineralinfo.org).

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., Gobran G.R. et 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.
- Turpault M.P., Nys C., Calvaruso C. 2009.** Rhizosphere impact on the dissolution of test minerals in a forest ecosystem. *Geoderma* **153**,147-154.
- Tye A.M., Kemp S.J., Poulton P.R. 2009.** Responses of soil clay mineralogy in the rothamsted classical experiments in relation to management practice and changing land use. *Geoderma* **153**, 136-146.
- Vale M., Nguyen C., Dambrine E., Dupouey J.L. 2005.** Microbial activity in the rhizosphere soil of six herbaceous species cultivated in a greenhouse is correlated with shoot biomass and root C concentrations *Soil Biology and Biochemistry* **37**, 2329-2333.
- Van Breemen N., 1995** Nutrient Cycling Strategies Plant and Soil **168-169**, 321-326.
- Van Hees P.A.W., Rosling A., Lundström U.S. 2006** The biogeochemical impact of ectomycorrhizal conifers on major soil elements (Al, Fe, K and Si). *Geoderma* **136** (1–2), 364-377.
- Van Noordwijk M., Martikainen P., Bottner P. 1998.** Global change and root function. *Global change biology* **4**, 759-772.
- Velde B., 2001.** Clay Minerals in the agricultural horizon of loams and silt loams in the central United States. *Clay Minerals*.**36**, 277-294.
- Velde, B., Peck T. 2002.** Clay mineral changes in the Morrow experimental plots, University of Illinois. *Clays and Clay Minerals*, **50**, 364-370.
- Velde B. , Barré P. 2010.** Soils, plants and clay minerals: mineral and biologic interactions Ed. Springer, 337p
- Verboom W.H., Pate J.S., Mehrooz Aspandiar M. 2010.** Neoformation of clay in lateral root catchments of mallee eucalypts: a chemical perspective *Ann Bot* **105** (1), 23-36.
- Vetterlein D., Reinhold J. 2004.** Gradients in soil solution composition between bulk soil and rhizosphere—In situ measurement with changing soil water content. *Plant Soil* **258**,307-317.
- 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.
- Vincenzo D.M., Arienzo M., Adamo P., Violante P. 2003.** Availability of Potassium, Calcium, Magnesium, and Sodium in “Bulk” and “Rhizosphere” Soil of Field-Grown Corn Determined by Electro-ultrafiltration *Journal of plant nutrition* Vol. **26(6)**, 1149-1168.
- 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).*
- 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.
- Wang X., Zabowski D., 1998** Nutrient composition of Douglas-fir rhizosphere and bulk soil solutions. *Plant and Soil* **200**,13-20.
- Wang J. G., Zhang F. S., Zhang X. L., Cao Y. P., 2000.** Release of potassium from K-bearing minerals: Effect of plant roots under P deficiency *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **56**, 45-52.
- Wang Z.Y., Kelly J.M., Kovar J.L. 2004.** In situ, dynamic of phosphorus in the rhizosphere solution of five species. *J. Environ. Qual.* **33**, 1387–1392.
- Wang J., Liu W.Z., Mu H-F., Dang T.H. 2010.** Inorganic Phosphorus Fractions and Phosphorus Availability in a Calcareous Soil Receiving 21-Year Superphosphate Application. *Pedosphere* **20(3)**, 304-310.

Watteau F., Villemain G., Burtin G. et Jocteur - Monrozier L. 2006. Root impact on the stability and types of microaggregates in silty soil under maize, *European Journal of Soil Science* 57,247-257.

Weiming S., Xiachang W., Weindong Y. 2004. Distribution patterns of available P and K in rape rhizosphere in relation to genotypic difference. *Plant and Soil* 261, 11-16.

Weligama C., Tang C., Sale P.W.G, Conyers M.K., Liu D.L. 2008. Localised nitrate and phosphate application enhances root proliferation by wheat and maximises rhizosphere alkalisation in acid subsoil. *Plant and soil* 312, 101-115

Wenzel W., Fitz T. 2005. Rhizosphere processes involved in phytoremediation of contaminated soils rhizosphere. Ecology and biogeochemistry group- www.rhizo.at.

Whalley W. R., Riseley B., Leeds-Harrison P.B., Bird N.R.A., Leech P.K., Adderley W. P. 2005. Structural differences between bulk and rhizosphere soil. *European Journal of Soil Science* 56: 353–360

Wild A. 1988. Russell's soil conditions of plant growth. Ed. Eleventh Edition. 600p.

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.

Yanai R.D., Majdi H., Park B.B. 2003. Measured and modelled differences in nutrient concentrations between rhizosphere and bulk soil in a Norway spruce stand. *Plant and Soil* 257, 133-142.

Yanai J., Lee C.K., Umeda M., Kosaki T. 2000. Spatial variability of soil chemical properties in a paddy field. *Soil Sci Plant Nutr.*, 46, 473-482.

Yara, 2009: Dynamique du potassium ([http://Fert.Yara.fr library/attachement/crop](http://Fert.Yara.fr/library/attachement/crop)).

Zeng Q., Brown P.H. 2000. Soil potassium mobility and uptake by corn under differential soil moisture regimes. *Plant and Soil* 221, 121-134.

Zhang F., Cao Y; 1992. Dynamics in the rhizosphere and plant nutrition [J]. *Acta Pedologica Sinica* 3, 239-250.

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.

Zhang F., Shen J., Zhang J., Zuo Y., Li L., Chen X. 2010. Rhizosphere Processes and Management for Improving Nutrient Use Efficiency and Crop Productivity: Implications for China. *Advances in Agronomy* 107, 1-32.

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.

Zhou L.L., Cao J., Zhang F.S., Li L. 2009. Rhizosphere acidification of faba bean,, soybean and maize. *Science of the total environment* 407, 4356-4362.

Abréviations

A : taux d'argiles en %

C : carbone du sol

CEC : capacité d'échange cationique

Cg : abscisse du centre de gravité

C/V : interstratifié chlorite vermiculite

F : figuier

G : sol global

I : illite

I/S: interstratifié enrichi en illite

S/I : interstratifié enrichi en smectite

KS : potassium soluble dans l'eau

KNH_4^+ : potassium extrait à l'acétate d'ammonium N

KHNO_3 : potassium extrait à l' HNO_3 N bouillant

Kne : potassium non échangeable

O : olivier

PCI: illite poor crystallized

RH : sol rhizosphérique

Rp : rizoplan

WCI : illite well crystallised

Tableaux

Tableau 1 : tableau synthétique de la comparaison de la concentration en potassium du sol global et de la rhizosphère en conditions contrôlées et au champ.....	39
Tableau 2 : exsudation d'ions par des racines d'espèce forestière ($\mu\text{g}/\text{mg}$ de racines sèches durant 14 jours) d'une forêt du New Hampshire (Smith, 1976).....	42
Tableau 3 : changement dans la concentration en nutriments (μM) échantillonnées in situ dans la rhizosphère de 5 espèces herbacées.....	43
Tableau 4 : principale caractéristiques des 16 stations.....	60
Tableau 5 : moyenne des précipitations mensuelles de Tizi-Ouzou pour la période de 1997–2007.....	59
Tableau 6 : moyenne des précipitations mensuelles de Bouira pour la période de 1997–2007.....	59
Tableau 7 : répartition des températures mensuelles maximales, minimales et moyennes de la région de Tizi-Ouzou.....	59
Tableau 8 : répartition des températures mensuelles maximales, minimales et moyennes de la région de Bouira.....	61
Tableau 9 : répartition des évapotranspirations mensuelles de la région de Tizi-Ouzou.....	62
Tableau 10 : répartition des évapotranspirations mensuelles de la région de Bouira.....	62
Tableau 11 : quelques données de base sur les oliveraies étudiées.....	76
Tableau 12 : variation des concentrations en potassium, calcium et magnésium foliaire en $\text{g}/100\text{g}$ de matière sèche.....	80
Tableau 13 : quelques propriétés chimiques du sol global et du sol rhizosphérique des 16 oliveraies.....	82
Tableau 14 : aire relative du pic de l'illite et de PCI, abscisse du centre de gravité et modification de l'abscisse du centre de gravité après saturation au potassium.....	93
Tableau 15 : principales caractéristiques physiques et chimiques du sol naturel.....	105
Tableau 16 : concentration en azote, en phosphore et potassium foliaire en %.....	105
Tableau 17 : principales propriétés chimiques et potassiques des 3 fractions de sols (sol global, sol rhizosphérique et rhizoplan) pour les différentes doses de potassium appliquées.....	108
Tableau 18 : relations entre certaines propriétés chimiques des trois fractions de sols.....	124
Tableau 19 : relations entre les différents pools de potassium dans les 3 fractions de sols.....	124
Tableau 20 : caractéristiques des diffractogrammes des argiles saturées au strontium et au potassium du sol naturel.....	134
Tableau 21 : caractéristiques des diffractogrammes décomposés des argiles saturées au strontium des sols fertilisés.....	139
Tableau 22 : variation du potassium fixé (en $\text{mg}/100\text{ g}$ de terre) par le sol global, le sol rhizosphérique et le rhizoplan.....	149
Tableau 23 : relations entre les paramètres de la minéralogie et les caractéristiques potassiques des sols rhizosphériques.....	152

Tableau 24 : données de bases sur les sites étudiés.....	158
Tableau 25 : quelques propriétés du sol global et du sol rhizosphérique des vergers étudiés.....	161
Tableau 26 : diminution de l'abscisse du centre de gravité dans la rhizosphère de l'olivier et augmentation du gain en centre de gravité dans la rhizosphère du figuier comparativement à celle de l'olivier.....	176

Figures

Figure 1 Cycle du potassium dans les sols (Syers 2003 in Römheld et Kirkby 2010).....	16
Figure 2 Conséquences d'une carence en potassium à différentes échelles et interactions connues avec des stress biotiques et abiotiques (Jordan Meille, 2011).....	19
Figure 3 Principaux composants de la rhizosphère (d'après Wenzel et Fitz, 2005).....	20
Figure 4 Rhizoplan entourant une racine d'orge cultivée au champ, on note le développement du chevelu racinaire dans les macropores et son rôle dans l'agrégation du sol A (Hinsinger et al., 2009). Interface racines- sol de la digitale (<i>Digitaria sanguinalis</i>), les poils absorbants sont clairement visibles en contact intime avec les particules de sols B (Mc Cully, 1995).....	20
Figure 5 Géométrie et extension spatiale de la rhizosphère (Wenzel et Fitz, 2005).....	21
Figure 6 Représentation schématique des différents stades de développement de la rhizosphère d'une plante mycorhize (par exemple une céréale). Le stade 0 correspond au sol avant l'arrivée de la racine. Le stade 1 représente l'arrivée de la racine au cours duquel l'exsudation de composés de carbone solubles et insolubles (mucilage) est plus important comparé à l'influx (absorption des exsudats par la racine et rétention par les sols). L'exsudation est maximale à la pointe de la racine et diminue graduellement le long de la racine. Une compression physique du sol se produit autour de la racine. Le stade 2 représente le développement de la rhizosphère au cours duquel le chevelu racinaire est en expansion et l'infection mycorhizienne apparait. Le taux d'exsudation diminue et l'influx de carbone à partir du sol survient (amino-acides) aussi bien que l'absorption d'exsudats par la racine. Le stade 3 représente une rhizosphère plus âgée ou la mort des cellules épidermales, corticales et du chevelu racinaire débute. L'infection mycorhizienne est bien développée. Le stade 4 représente une rhizosphère desséchée où la mort des cellules corticales et des hyphes mycorhiziens a commencé. L'influx de carbone a beaucoup diminué. Le stade 5 représente une rhizosphère relique où la racine est complètement décomposée formant ainsi un canal dans le sol. Durant les stades de 0 à 5 la population microbienne s'est développée avec un pic au stade 3et à diminuée graduellement jusqu'au stade 5 (Jones et al., 2004).....	23
Figure 7 Représentation schématique d'une coupe longitudinale d'une racine en croissance montrant les principales sources de la rhizodéposition : 1 perte de la coiffe de la racine et des parois cellulaires, 2 émission de mucilage insoluble, 3 émission d'exsudats racinaires solubles, 4 émission de composés carbonés organiques volatils, 5 perte de C à partir de symbiotes (mycorhizes à arbuscules, par exemple) et 6 pertes de carbone à cause de la mort et la lyse des cellules de l'épiderme et du cortex racinaire(Jones et al., 2009).....	25
Figure 8 Rôle des exsudats dans les processus rhizosphériques (Marschner et Rengel, 2007).....	26
Figure 9 Représentation schématique des interactions physico-chimiques entre racine, solution et constituants minéraux du sol dont la rhizosphère est le siège (Hinsinger, 2001).....	28
Figure 10 Acidification (en foncé) et/ou alcalinisation (en clair) d'une mince couche d'agar recouverte de racines d'une culture de colza de 7 jours avec une solution nutritive sans phosphore (à gauche) et avec phosphore (à droite). L'agar (pH= 5,8) contenait du rouge de bromocresol (Hoffland et al., 1989).....	29
Figure 11 Visualisation de l'acidification de la rhizosphère de (a) féverole, (b) soja, (c) maïs, (d) féverole en association avec le maïs, (e) soja en association avec le maïs. Les racines sont imbibées d'un indicateur coloré de pH le bleu de bromocrésol (Zhou et al., 2009).....	30

Figure 12 Représentation schématique du fonctionnement des racines induisant des modifications dans les propriétés physiques et chimiques de la rhizosphère (Gobran et Clegg, 1996).....	31
Figure 13 Altération révélée par la diffraction des Rayons X de biotite et de phlogopite soumis pendant 14 jours à une culture de ray gras alimentée par une solution nutritive sans potassium (Hinsinger et al.1993).....	32
Figure 14 Diffractogrammes décomposés de la fraction argileuse saturée au potassium, sans traitement et après 31 jours de culture de Ray Grass (Barré et al. 2007 b).....	33
Figure 15 Diffractogrammes de la fraction < 2µm du sol rhizosphérique d'arbres forestiers (April et Keller, 1990).....	34
Figure 16 Diffractogrammes de la fraction < 2µm du rhizoplan d'arbres forestiers (April et Keller, 1990).....	34
Figure 17 Diffractogrammes décomposés de la fraction < 2µm du sol rhizosphérique d'arbres forestiers (Turpault et al., 2008).....	35
Figure 18 Acquisition des éléments nutritifs et fonctionnement de la rhizosphère (Wenzel et Fitz 2005).....	37
Figure 19 Effet d'un apport localisé de nutriments dans la rhizosphère sur la prolifération racinaire et le développement du maïs. (A) Croissance comparée du maïs sur un sol carbonaté avec le témoin à gauche et le traitement avec apport localisé d'azote et de superphosphate à droite (RM) comme pratique de la gestion de la rhizosphère ; la prolifération racinaire est limitée chez le témoin ; la localisation des engrais a provoqué une prolifération racinaire et une acidification de la rhizosphère ; comparaison de la prolifération racinaire entre le témoin (à gauche) et la rhizosphère de maïs traitée avec des engrais localisés (à droite) (D) ; acidification de la rhizosphère (couleur jaune clair) de la rhizosphère traitée (à gauche) comparativement au témoin à droite (E) (Zhang et al., 2010).	48
Figure 20 Stratégies pour la gestion de la rhizosphère basées sur la manipulation des principaux constituants et processus de la rhizosphère. La photo ci-dessus montre le développement plus important d'un génotype de maïs plus efficace dans le prélèvement du phosphore en raison d'un système racinaire de grande taille (à gauche).....	49
Figure 21 Modèle conceptuel de la gestion de la rhizosphère pour optimiser l'utilisation des intrants de nutriments en maximisant les processus de mobilisation et d'acquisition des éléments nutritifs dans la rhizosphère dans l'objectif d'augmenter la productivité de la culture. La productivité de la culture est limitée en conditions de faibles et de forts intrants. Par contre, au niveau optimal d'apport d'éléments nutritifs, il existe une très bonne efficacité entre les processus de la rhizosphère et le niveau d'apport, par conséquent la productivité s'élève (Zhang et al., 2010).....	50
Figure 22 Teneur en huile et doses de sulfate de potassium (Sopib, 2009).....	52
Figure 23 Localisation des différents sites d'études.....	60
Figure 24 Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gausсен de la région de Tizi-Ouzou (a) et de la région de Bouira (b).....	63
Figure 25 Exemple de décomposition d'un diffractogramme d'argile dominé par un pic autour de 1,4 nm.....	72
Figure 26 Accroissement significatif de la fraction argileuse (a), de la teneur en carbone du sol (b), en CEC (c) et du pH (d) dans le sol rhizosphérique des 16 stations étudiées.....	85

Figure 27 Accroissement significatif du potassium soluble (a), du potassium extractible à l'AcNH ₄ (b), du potassium non échangeable (c) et du potassium extractible à l'acide nitrique (d).....	86
Figure 28 Potassium assimilable dans le sol global et la rhizosphère.....	90
Figure 29 Relation entre le potassium foliaire et le potassium assimilable (a) et le potassium extractible à l'acide nitrique (b).....	91
Figure 30 Diffractogrammes décomposés des argiles saturées au SrCl ₂ et KCl de la station de Tizi Rached.....	94
Figure 31 Schéma du dispositif expérimental et échantillonnage des trois fractions de sol.....	104
Figure 32 Accroissement du taux de carbone (a), de la CEC (b), du pH (c) dans les rhizoplans.....	112
Figure 33 Teneurs en KS et KNH ₄ ⁺ dans les trois fractions du sol (a, c). Appauvrissement relatif de la rhizosphère en KS et KNH ₄ ⁺ des sols fertilisé avec du potassium (b, d), léger enrichissement en KS et KNH ₄ ⁺ du rhizoplan de NPK ₀	114
Figure 34 Taux de saturation en potassium dans le sol global, le sol rhizosphérique et le rhizoplan de l'olivier pour les différentes doses d'application (a). Diminution relatif du taux de saturation en potassium de la rhizosphère des sols fertilisés avec du potassium, légère augmentation du taux de saturation en potassium de la rhizosphère en absence d'application de potassium (b).....	117
Figure 35 Teneurs en KHNO ₃ dans le sol global, le sol rhizosphérique et le rhizoplan de l'olivier pour les différentes doses d'application (a). Appauvrissement relatif de la rhizosphère en KHNO ₃ des sols fertilisés avec du potassium, enrichissement en potassium assimilable de la rhizosphère en absence d'application de potassium.....	120
Figure 36 Relation entre le carbone organique et le KS (a) et le KNH ₄ ⁺ (b) du rhizoplan.....	123
Figure 37 Diffractogrammes des argiles saturées au strontium du sol global, du sol rhizosphérique et du rhizoplan du sol naturel.....	131
Figure 38 Diffractogrammes des argiles saturées au SrCl ₂ du sol global naturel(N ₀ P ₀ K ₀) et du sol global fertilisé.....	135
Figure 39 Diffractogrammes décomposés des argiles du sol global, du sol rhizosphérique et du rhizoplan fertilisé (NPK ₀ , NPK ₁ et NPK ₃).....	137
Figure 40 Position de l'abscisse du centre de gravité (a) et de la phase argileuse S/I (b) en fonction des doses pour les 3 fractions de sols.....	141

Figure 41 Processus de smectitisation ou d'illitisation dans le rhizoplan (a) et la rhizosphère(b).....	144
Figure 42 Diminution de la fraction de potassium non échangeable (a), augmentation de la fraction de KNH_4^+ (b) avec l'accroissement de la teneur en carbone du sol dans les rhizoplans.....	149
Figure 43 Caractéristiques chimiques du sol global et du sol rhizosphérique de l'olivier et du figuier, pH (a), carbone du sol (b) et la CEC(c).	163
Figure 44 Formes biodisponibles du potassium du sol global et du sol rhizosphérique. K_s (a), KNH_4^+ (b), Kne (c) et KHNO_3 (d).....	167
Figure 45 Diffractogrammes des argiles saturées au strontium des deux fractions de sol de l'olivier et du figuier de la station de Guendoul (a) et de la station de Bouira (b).....	168
Figure 46 Diffractogrammes décomposés des argiles du sol global et du sol rhizosphérique de l'olivieraie de Guendoul.....	177
Figure 47 Diffractogrammes décomposés des argiles du sol global et du sol rhizosphérique de l'olivieraie de Bouira.....	178
Figure 48 Diffractogrammes décomposés des argiles du sol global et du sol rhizosphérique de la figueraie de Guendoul.....	182
Figure 49 Diffractogrammes décomposés des argiles du sol global et du sol rhizosphérique de la figueraie de Bouira.....	183
Figure 50 Augmentation de la CEC avec le déplacement de l'abscisse du C_g vers le domaine de la smectite (a) l'enrichissement en S/I des argiles contribue à accroître la CEC des sols (b), enrichissement des sols en potassium non échangeable avec le déplacement de l'abscisse du C_g vers le domaine de l'illite (c) et enrichissement des argiles des sols en potassium non échangeable biodisponible avec le déplacement de l'abscisse du C_g vers le domaine de l'illite (d).....	184
Figure 51 Relation entre l'aire relative de l'illite et le potassium non échangeable des argiles pour les deux fractions de sol des deux espèces.....	187
Figure 52 Relation entre l'aire relative de PCI et le potassium non échangeable des argiles pour les deux fractions de sol des deux espèces.....	188
Figure 53 Relation entre l'aire relative de S/I et le potassium non échangeable des argiles pour les deux fractions de sol des deux espèces.....	188

Figure 54 Relation entre l'aire relative de S/I et le potassium non échangeable des argiles pour les deux fractions de sol des deux espèces.....189