الجمهوريـــــــة الجزائريـــــــة الديمقراطيـــــة الشعبيـــــة
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعـلـيـم العـالـــي والبـحـــث العـلـمـــي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem جامعة عبد الحميد بن باديس_ مستغانـم
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie كلية علوم الطبيعة و الحياة
Département des Sciences Agronomiques قسم العلوم الزراعية

Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de

Magister en Sciences Agronomiques

Option

« Agroforesterie et développement rural durable en milieux semi-arides »

Présenté par : **Melle FETTOUCH Dalila**

Thème

Impacts des systèmes agroforestiers sur les propriétés physico-chimiques, hydriques et la fertilité des sols en milieux semi-arides

Cas de la plaine des Bordjias (Mesra, W. de Mostaganem)

Laboratoire régional de l'institut national des sols, de l'irrigation et du drainage.

La Composition du jury de la soutenance :

Nom et prénom		Qualité	Grade	Appartenance administrative
Mr. Benkhelifa	Mohamed	Pr	Président	Université de Mostaganem
Mr. Larid	Mohamed	MC_A	Promoteur	Université de Mostaganem
Mr. Bekada	Ahmed Mohamed Ali	Pr	Examinateur	C. Universitaire de Tissemsilt
Mr. Haddad	Ahmed	MC_A	Examinateur	Université de Mostaganem

Soutenu le ; 25/04/2016

Remerciements

Au terme de ce travail, il m'est agréable d'exprimer mes remerciements à tous ceux qui ont contribué de prés ou de loin à l'élaboration de ce mémoire.

Mes remerciements vont tout particulièrement à **Mr. LARID Mohamed**, Docteur à l'université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, qui a bien voulu assurer mon encadrement, c'est un très grand honneur pour moi qu'il ait accepté d'être mon directeur de mémoire. Je lui dois une immense reconnaissance et un très grand respect.

Je tiens également à adresser mes vifs remerciements à Messieurs :

- **BENKHELIFA Mohamed**, Pr : Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem ;
- **BEKADA Ahmed Mohamed Ali**, Pr : Centre Universitaire de Tissemsilt ;
- **HADDAD Ahmed,** MCA **:** Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem.

Pour m'avoir honoré de leur présence en acceptant de juger ce travail.

Mes remerciements vont également à **Mr. GACEM Farid,** Directeur de l'institut national des sols, de l'irrigation et du drainage de l'Ouest (wilaya de Relizane), de m'avoir aidé dans mon travail et de m'avoir accueilli dans son unité de recherche, je lui dois un très grand merci.

Je tiens aussi à remercier **Mr. GORINE Mohamed,** Chef de la station de l'INRA de H'Madna (wilaya de Relizane)**,** pour ses conseils et pour son aide précieuse, je lui dois une immense reconnaissance.

Mes remerciements s'adressent à **Mr. BELHIMER Mahieddine,** Chef de la subdivision agricole de la Daïra de Mesra pour l'aide précieuse qu'il m'a fournie.

Enfin, et bien que des simples remerciements ne suffisent pas pour exprimer tout ce que je leur dois, mes remerciements les plus chaleureux à mes parents et à tous les membres de ma famille.

D. Fettouch

Résumé : Tous les problèmes, reliés à l'agriculture conventionnelle sont un indicatif à la recherche de solutions durables. Dans ce contexte, une étude comparative entre trois systèmes agroforestiers *(Citrus sinensis, Olea europaea et Punica granatum* associé chacun à *Vicia faba)* a été menée dans la plaine des Bordjias. Afin d'étudier les impacts de chaque système sur les propriétés physico-chimiques, hydriques et la fertilité des sols, des échantillons de sol ont été prélevés sur deux placettes (sous et hors arbre), à travers trois horizons (Hs, Hm et Hi), avant et après la mise en place de la culture (*Vicia faba)* avec un suivi de sa croissance et une estimation de son rendement. Les résultats montrent que la variabilité de l'humidité semble être influencée par la position, le type du sol et l'espèce ligneuse. En augmentant la teneur en matière organique, ces associations améliorent la stabilité structurale des sols, accélérant les processus de dissolution des carbonates de calcium, modifiant ainsi le pH, la CE, le P_2O_5, la CEC, l'équilibre entre les cations et l'échange ionique dans le sol. L'approche statistique (ANOVA) nous a permis de faire ressortir l'importance des relations entre les arbres en général et les systèmes agroforestiers en particuliers avec la fertilité des sols.
Ainsi, l'agroforesterie associant sur les mêmes parcelles une vocation mixte de production agricole annuelle et de production différée à long terme par les arbres, offre des perspectives nouvelles pour une agriculture différente, productive et respectueuse de l'environnement**.**

Mots clés : Agroforesterie, fertilité, sols, milieux semi-arides, plaine des Bordjias.

Summary: All the problems, related to conventional agriculture are a reference to the search for the sustainable solutions. In this context, a comparative study between three agroforestry systems (*Citrus sinensis, Olea europaea* and *Punica granatum* each associated with *Vicia faba*) was conducted in the plain of Bordjias. In order to study the impacts of each system on physic-chemical properties, water and soil fertility, the soil samples were taken from two plots (on and off the tree), through three horizons (Sh, Mh and Lh), before and after the establishment of culture (*Vicia faba*) with follow-up of its growth, and performance estimate. The results show that the moisture variability appears to be influenced by the position, the type of soil and the woody species. By increasing the organic matter content, these associations improve the structural stability of the soil, accelerating the process of dissolution of calcium carbonate, changing the pH, EC, the P_2O_5, CEC, balancing cations and ion exchange in soil. The statistical approach (ANOVA) allowed us to bring out the importance of relations between the trees in general and agroforestry systems in particular with soil fertility.
Thus, agroforestry combining on the same plots mixed vocation of annual agricultural production, and deferred long-term production by trees, offers the new perspectives for a different agricultural, productive and environmentally friendly.

Keywords: Agroforestry, fertility, soil, environments semi-arid, plain Bordjias.

ملخص: جميع المشاكل المرتبطة بالزراعة الاصطلاحية دلائل على البحث عن حلول مستدامة. في هذا السياق، دراسة مقارنة بين ثلاث أنظمة زراعية مختلطة بالأشجار(البرتقال، الزيتون والرمان كل مرتبطة مع الفول) أجريت في سهل البرجية. حتى تدرس آثار كل نظام على الخصائص الفيزيائية والكيميائية والمياه وخصوبة التربة، عينات من التربة تم أخذها من قطعتين (تحت وبعيدا عن الشجرة)، من خلال ثلاثة طبقات(الطبقة العلوية، الوسطى والسفلية)، قبل وبعد غرس الزراعة (الفول) ، مع متابعة نموه وتقدير مردوده. النتائج توضح أن تغيرية الرطوبة متأثرة بالوضعية، نوع التربة والأنواع الخشبية. برفعهم محتوى المادة العضوية، هذه الارتباطات تحسن الاستقرار الهيكلي للتربة، تسرع في عملية انحلال كربونات الكالسيوم، تعدل درجة الحموضة، الملوحة، الفسفور، قدرة التبادل الكاتيوني، التوازن بين الكاتيونات والتبادل الأيوني في التربة. المنهج الإحصائي(التباين) سمح لنا بإبراز أهمية العلاقات بين الأشجار عامة والزراعة المختلطة بالأشجار خاصة مع خصوبة التربة.
كذلك الزراعة المختلطة بالأشجار تجمع في نفس الأراضي قدرة مختلطة بين الإنتاج الزراعي السنوي و الإنتاج المؤخر على المدى البعيد من طرف الأشجار، ويوفر آفاقا جديدة من أجل زراعة مختلفة، منتجة ومحترمة للمحيط.

كلمات مفاتيح: الزراعة المختلطة بالأشجار، خصوبة، تربة، أوساط شبه جافة، سهل البرجية

Table des matières

Introduction générale…… 06

Chapitre I : Synthèse bibliographique

1.1. L'agroforesterie …….. 07
1 .1.1. Définition de l'agroforesterie …… 07
1.1.2. Différentes formes d'agroforesterie …….. 07
1.1.3. Systèmes pratiqués et techniques …….. 07
1.1.4. Principales techniques agroforestières ……..…….. 08
1.1.5. Systèmes de cultures intercalaires ……..…….. 09
1.1.5.1. Choix de l'orientation et de la densité d'arbres ……..…….. 09
1.1.5.2. Critères de sélection des espèces ligneuses……..…….. 10
1.1.5.3. Cultures intercalaires……..…….. 10
1.2. Effets des ligneux sur les propriétés des sols …….. 11
1.3. Conclusion …….. 12

Chapitre II : Présentation de la zone d'étude

2.1. Situation géographique…… 12
2.2. Situation administrative …….. 12
2.3. Caractéristiques climatiques…….. 13
2.3.1. Pluviométrie…….. 13
2.3.2. Températures……..…….. 13
2.3.3. Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen…… 14
2.3.4. Le quotient pluviométrique et le climagramme d'Emberger…… 14
2.3.5. Humidité relative…….. 15
2.3.6. Vents……..…….. 16
2.3.7. Insolation……..…….. 16
2.3.8. Evapotranspiration…… 17
2.3.9. Gelées …….. 17
2.3.10. Brouillard…….. 17
2.4. Caractérisation du milieu …… 18
2.4.1. Géomorphologie…….. 18
2.4.2. Hydrogéologie de la zone d'étude…… 19
2.4.2.1. Aquifère principal…….. 19
2.4.2.2. Aquifère de la plaine des Bordjias…….. 19
2.4.3. Pédologie de la zone d'étude …….. 19
2.4.3.1. Sols alluviaux……..…….. 19
2.4.3.2. Sols à encroûtement calcaire…….. 20
2.5. Agriculture…….. 20
2.6. Conclusion …….. 21

Chapitre III : Etude expérimentale

3.1. Matériels et méthodes…….. 22
3.1.1. Choix des sites…….. 22
3.1.1.1. Situation des sites expérimentaux …….. 22
3.1.2. Matériels …….. 24
3.1.2.1. Caractéristiques des ligneux…….. 24
A. Site 01 …… 24
B. Site 02 …… 24
C. Site 03 …… 25
3.1.2.2. Culture intercalaire…… 27

3.1.3. Méthodes…….. 27
3.1.3.1. Entretien …… 27
3.1.3.2. Caractéristiques des espèces ligneuses…….. 27
3.1.3.3. Approche expérimentale……..…. 27
3.1.3.4. Échantillonnage……..…….. 29
3.1.4. Caractérisation des sols……..... 30
3.1.5. Mise en place de la culture intercalaire (*Vicia faba*)……..……..... 34
3.1.5.1. Croissance de la culture intercalaire …… 34
3.1.5.2. Rendement de la culture intercalaire …… 34
3.1.6. Méthodes d'analyses physico-chimiques et hydriques des sols……... 34
3.1.6.1. Granulométrie …….. 34
3.1.6.2. Densité apparente …….. 35
3.1.6.3. Calcaire total ……..... 36
3.1.6.4. pH …… 36
3.1.6.5. Conductivité électrique …… 38
3.1.6.6. Carbone organique …… 39
3.1.6.7. Azote total (N)…….. 39
3.1.6.8. Rapport C/N…….. 39
3.1.6.9 . Phosphore assimilable (P_2O_5)…….. 39
3.1.6.10. Dosage des cations …….. 40
3.1.6.11. Dosage des anions ……... 40
3.1.6.12. Capacité d'échange cationique (CEC) …… 40
3.1.6.13. Humidité pondérale……..... 41
3.1.7. Traitement statistique des données ……..... 41
3.1.7.1. Analyse en composantes principales (ACP)…….. 41
3.1.7.2. Analyse de variance ……..... 42
3.2. Résultats et discussions ……..... 43
3.2.1. Interprétation des observations des profils culturaux…….. 43
3.2.2. Interprétation des résultats d'analyse granulométrique des sols…….. 44
3.2.3. Suivi de la croissance de la culture intercalaire et estimation du rendement…….. 45
3.2.4. Interprétation des résultats de l'ACP……... 47
3.2.4.1. L'effet des arbres……... 47
A. L'effet des arbres sur les propriétés physico-chimiques et hydriques des sols…….…. 47
B. L'effet des arbres sur le bilan ionique des sols……... 52
3.2.4.2. L'effet des systèmes agroforestiers……..…….. 54
A. L'effet des systèmes agroforestiers sur les propriétés physico-chimiques et hydriques des sols……..... 54
B. L'effet des systèmes agroforestiers sur le bilan ionique des sols…… 58
3.2.5. Interprétation des résultats de l'analyse de variance……..…….. 59
3.2.5.1. L'effet des arbres……..…….. 60
3.2.5.2. L'effet des systèmes agroforestiers……... 61
3.2.5.3. Comparaison et discussion……..... 62
3.2.6. Conclusion ……..……..... 68
Conclusion générale …….... 69
Références bibliographiques……..... 71
Annexes……..……..... 76

Introduction générale

La préservation des ressources naturelles est l'un des domaines de recherche en lien avec la problématique du développement durable. Parmi ces ressources, le sol occupe une position particulière de par ses fonctions à la fois agronomiques et environnementales (Richard, 2008). Ressource non renouvelable avec des taux de dégradation potentiellement rapides et des processus de formation et de régénération extrêmement lents (Anonyme, 2011), il est soumis à des pressions naturelles et anthropiques sans précédent et ne peut plus remplir parfaitement ses fonctions (Trehen et al., 2003).

Les associations d'arbres et de cultures agricoles peuvent être très efficaces, à la fois en termes de production, mais aussi en termes de protection de l'environnement. Ces systèmes appelés agroforestiers peuvent trouver une place dans une agriculture moderne plus respectueuse de l'environnement et plus diversifiée (Brootcorne, 2011). Il est abondamment prouvé que les ligneux, dans les systèmes agroforestiers, peuvent aider à entretenir les propriétés physiques du sol, ce qui est important pour la fertilité du sol (Young, 1995).

Dans de nombreux agro-écosystèmes traditionnels, que ce soit en milieu tropical, méditerranéen ou tempéré, la composante arborée, qu'elle soit sous forme de haie, d'alignements, de haie brise vent, d'arbres isolés, et même de forêt cultivée ; fait partie intégrante du système de production mais participe aussi à sa stabilité. A travers de nombreuses interactions biophysiques, l'arbre agit sur le sol, directement à travers son enracinement, mais aussi indirectement à travers la litière (amélioration de la fertilité du sol) et l'ombrage (atténuation de la demande évaporative de l'air) que procurent sa canopée, les habitats et les cortèges d'insectes qui lui sont spécifiques (Anonyme, 2011).

Les systèmes agroforestiers, qui désignent un mode d'utilisation des terres associant arbres et cultures, existent en Algérie depuis des siècles où le rôle des arbres dans les systèmes agricoles en a été négligé par les agriculteurs.

Dans ce contexte, nous avons mené cette étude portant sur l'impact des systèmes agroforestiers sur les propriétés physico-chimiques et hydriques des sols afin de déterminer les modifications subies au niveau du sol par la présence de l'arbre (*Citrus sinensis*, *Olea europaea* et *Punica granatum*) en association avec une culture (*Vicia faba*). Cette étude s'articule autour d'un :

- ❖ Un premier chapitre portant sur une synthèse bibliographique.
- ❖ Un deuxième chapitre portant sur la présentation de la zone d'étude.
- ❖ Un troisième chapitre consacré à une description des matériels et méthodes utilisés lors de notre expérimentation avec la présentation des résultats et leurs interprétations.
- ❖ Une conclusion suivie de quelques suggestions.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

1.1. L'agroforesterie

1 .1.1. Définition de l'agroforesterie

L'agroforesterie est un système intégré de gestion des ressources naturelles du territoire rural qui repose sur l'association intentionnelle d'arbres ou d'arbustes à des cultures ou à des élevages et dont l'interaction permet de générer des bénéfices économiques, environnementaux et sociaux (Baets et al., 2007). Elle procure de nombreux avantages, telle que la protection des cultures, des animaux d'élevage, des sols et des cours d'eau. Elle permet également de diversifier les revenus agricoles par la production de bois et de produits forestiers non ligneux. Les pratiques agroforestières stimulent aussi la biodiversité, contribuent au captage du carbone et embellissent les paysages (Dupraz et al, 2011).

1.1.2. Différentes formes d'agroforesterie

On pratique l'agroforesterie chaque fois que sont combinées la culture de plantes saisonnières à celle des plantes ligneuses avec intégration de l'élevage. A ce sujet Torquebiau (1990) note que la présence des ligneux est indispensable pour la définition d'un système agroforestier. Il existe différentes formes d'agroforesterie qui peuvent être récapitulées comme suit :

- Parcelles agricoles plantées d'arbres fruitiers ou fourragers ;
- Pâturage entouré d'arbres produisant du bois ;
- Ligne d'arbres brise vent ;
- Cultures en couloir alternant les allées et les haies ligneuses ;
- Jachère arborée ;
- Plantation forestière avec culture annuelles en sous-bois.

1.1.3. Systèmes pratiqués et techniques

Il existe un éventail de systèmes agroforestiers à travers le monde et un certain nombre de classification est possible selon plusieurs critères. Une classification repose, par exemple, sur le type de composants : on distingue alors les systèmes sylvopastoraux (association élevages- espèces ligneuses), agrosylviculturaux (association espèces ligneuses- plantes saisonnières) et agrosylvopastoraux (association élevages- espèces ligneuses- plantes saisonnières) (Dupraz et al, 2011).

La classification des systèmes agroforestiers peut aussi se faire en s'appuyant sur la principale fonction du système : des systèmes multifonctionnels (les haies brise-vent, les systèmes

riverains agroforestiers), des systèmes à vocation productive (l'apisylviculture, culture sous couvert forestier, les cultures intercalaires, la ligniculture en courtes rotations).

Parmi les systèmes agroforestiers s'adaptant aux conditions écologiques et socioéconomiques de notre région on a :

❖ Les systèmes agrosylvicoles qui se distinguent par une culture dans les plantations forestières recelant des sols à potentiel intéressant. Beaucoup d'espèces forestières peuvent être associées à des espèces vivrières. Un système connu sous le nom de méthode Taungya est largement pratiqué en Asie. cette méthode se distingue par deux systèmes sur le même espace, l'un à long terme (sylviculture) et l'autre annuel ou bisannuel (cultures vivrières saisonnières) soit une phase courte agricole et une autre longue forestière. Un autre système semble intéressant, système à dominante ligneuse pérenne avec un agencement spatial des espèces qui le composent.

❖ Le système agroforestier prenant en charge un ensemble de composantes interdépendantes; ligneux, cultures annuelles et animaux. Il représente un type courant d'utilisation des terres dans une région donnée ; Il peut être décrit à l'échelle d'une parcelle, d'une exploitation ou d'une région entière. Ce système fait appel à des pratiques agroforestières qui englobent les façons de faire des agriculteurs dans toute leur diversité (Torquebiau, 1990).

1.1.4. Principales techniques agroforestières

Selon Charif (2001), cinq techniques pouvant être appliquées dans nos espaces : cultures sous couvert arboré, agroforêts, disposition linéaire, techniques séquentielles et production animale sous couvert arboré (cf. tab. 01). Elles sont toutes basées sur l'utilisation des arbres.

Tab.01 : Principales techniques agroforestières (Charif, 2001)

Techniques agroforestières	**Bases fondamentales**
Cultures sous couvert arboré	-Arbres dispersés dans les parcelles agricoles. -Plantations de rente associées à des arbres à usage multiple. -Arbres d'ombrage sur cultures.
Agroforêts	- Jardins-forêts. -Parcelles boisées et utilisation à d'autres fins.
Disposition linéaire	-Brise vent et rideau –abri. -Plantations de lisière. -Clôtures et haies vives. -Bandes boisées et haies arbustives. -Haies en courbe de niveau. -Cultures en couloirs.
Techniques séquentielles	-Agriculture itinérante. -Jachère arborée améliorée. -Méthode Taungya.
Production animale sous couvert arboré	-Pâturage sous les arbres. -Production fourragère sous des plantations. -Production fourragère en plantation de protection.

1.1.5. Systèmes de cultures intercalaires

La culture intercalaire est l'une des pratiques agroforestières les plus anciennes et les plus répandues dans les zones méditerranéennes. Il s'agit de plantations d'arbres ou d'arbustes en rangées largement espacées, entre lesquelles des cultures agricoles ou horticoles sont produites (Williams et al., 1997). Baldy et al. (1993) définissent le système de la culture intercalaire comme étant un peuplement à deux strates qui permet une exploitation accrue des ressources du milieu grâce aux interactions bénéfiques entre l'arbre et les cultures associées. Ces systèmes agro-sylvicoles intercalaires trouvent leurs racines dans des systèmes traditionnels où la présence des arbres n'était pas forcément liée à la production de bois d'œuvre, mais souvent à la production de fruits.

La culture intercalaire offre des avantages économiques considérables. Premièrement, elle permet d'optimiser un facteur de production agricole important : l'espace cultivable. Les rendements des deux productions distinctes peuvent être inférieurs à ceux obtenus en monoculture, mais leur production combinée à l'hectare est souvent supérieure à celle de la monoculture. Deuxièmement, la juxtaposition d'arbres et de cultures annuelles crée des écosystèmes agricoles qui, adéquatement conçurent, permet de diversifier les revenus agricoles et de répartir le risque d'investissement dans le temps. Troisièmement, les cultures intercalaires remplissent également des fonctions environnementales : l'amélioration des habitats fauniques, la réduction de l'érosion et de la pollution diffuse ainsi que l'embellissement du paysage (Garrett et al., 2000).

1.1.5.1. Choix de l'orientation et de la densité d'arbres

L'orientation des lignes d'arbres s'effectue selon différents critères :

- La lutte contre l'érosion : lignes d'arbres sur les courbes de niveau si la parcelle est pentue;
- La protection contre le vent : lignes d'arbres contre le sens des vents dominants;
- La recherche d'un ensoleillement adapté aux besoins de la culture ; une orientation nord sud est conseillée pour homogénéiser l'éclairement de la culture. Cependant, cela peut être intéressant sur une prairie que l'éclairement ne soit pas homogène et qu'il décale les pousses d'herbe (Garrett et al., 2000).

Le choix de l'espacement détermine plusieurs facteurs cruciaux de la production ligneuse, non ligueuse et agricole : la luminosité, l'accès aux nutriments et à l'eau du sol, les courbes de niveau du terrain en pente, le ratio arbres/cultures (Liagre, 2009).

Le choix de la densité dépend avant tout de l'équilibre recherché entre les arbres et les cultures. En agroforesterie, une densité entre 30 et 150 arbres par hectare facilite le travail de la culture intercalaire et évite des compétitions trop fortes entre arbres et culture. Selon Dupraz et al.

(2011), on recommande des distances entre les lignes d'arbres à au moins deux fois la hauteur des arbres adultes. La distance entre les arbres de la ligne varie entre 4 et 10 mètres.

1.1.5.2. Critères de sélection des espèces ligneuses

Le choix des essences doit être adapté aux conditions pédoclimatiques de chaque parcelle. Ce choix est capital puisque les arbres ont des exigences étroitement liées au sol et au climat. Selon que le sol soit plutôt calcaire, plutôt argileux ou limoneux par exemple et selon les zones biogéographiques, le choix des essences diffère (Verheij, 2005).

La sélection d'espèces ligneuses repose sur un ensemble de considérations biophysiques, économiques et esthétiques. Parmi celles-ci, les plus importantes sont la valeur marchande des produits provenant de l'arbre (fruits, bois, noix) et les caractéristiques morphologiques qui permettent de créer les conditions micro-environnementales favorables à la croissance et au développement des cultures annuelles (Garrett et al., 2000).

Les caractéristiques les plus intéressantes des arbres associés aux cultures intercalaires peuvent être énumérées comme suit :

- ❖ Production diversifiée de plusieurs formes de produits à haute valeur marchande ;
- ❖ Croissance rapide des cultures (ou croissance réduite mais compensée par la dimension économique et/ou environnementale des espèces) ;
- ❖ Pouvoir d'adaptation à plusieurs types de sol ;
- ❖ Faible production d'ombre ;
- ❖ Enracinement profond avec peu de racines superficielles ;
- ❖ Décomposition rapide de la litière (exception faite des sites où l'érosion est importante);
- ❖ Fixation d'azote ;
- ❖ Feuillage non générateur d'acides (Dupraz et al., 2011).

1.1.5.3. Cultures intercalaires

Les exemples de cultures intercalaires les plus performantes en zone d'étude sont des cultures annuelles (cultures maraichères, céréales, cultures fourragères, légumes secs) entre les rangées d'oliviers (*Olea europaea*), de grenadiers (*Punica granatum*) et de figuiers (*Ficus carica*). Ainsi une attention particulière doit être portée aux cultures annuelles notamment :

❖ Les cultures maraîchères : certains endroits pourront connaître une intensification en irrigué, et en association avec l'olivier et le grenadier. A cet effet, les efforts devront être consentis essentiellement au niveau de la zone de Touahria, de Mesra et d'Ain sidi Cherif.

❖ Les cultures fourragères : compte tenu de la faiblesse des ressources en eau enregistrée au niveau de l'espace étudié, les possibilités d'extension en irrigué des fourrages sont limitées. Il sera

surtout question d'envisager leur extension en sec. La diversification des cultures fourragères est très limitée. Ces cultures se limitent pratiquement et essentiellement à la culture de blé dur, l'orge et l'avoine.

❖ Les légumes secs : les légumes secs par leur apport appréciable en protéines et leur enrichissement des sols en azote devront être étendus dans le cadre d'un assolement triennal (Céréales, Fourrages, Légumes secs).

1.2. Effets des ligneux sur les propriétés des sols

La contribution potentille de l'arbre à l'amélioration des sols est l'un des principaux avantages de l'agroforesterie en général et, plus spécifiquement, des systèmes de cultures intercalaires.

Les études qui comparent les rendements des cultures semées sur des sols qui se sont formés sous couvert d'arbres à ceux de parcelles témoins découvertes font apparaître le rôle de l'arbre dans l'amélioration de la fertilité des sols. Verinumbe (1987), Moussa (1997), Samba(1997) ; cité par Boffa (2000), Yélémou et al. (2013) ont observé que le maïs, le mil et le sorgho produisent davantage de matière sèche sur des sols provenant de plantations d'arbres que sur des sols de culture ordinaires. Les rendements agricoles les plus élevés ont été obtenus dans des sols prélevés sous *Azadirahta indica*, suivi de *Prosopis juliflora*, d'*Eucalyptus camaldulensis*, de *Hyphaene thebaica*, de *Faidherbia albida*, de *cordyla pinnata* et de *Piliostigma reticulatum.*

Les analyses chimiques de sols prélevés sous des arbres en zone semi-aride font apparaître qu'en général, la fertilité des stations situées sous des houppiers isolés est élevée qu'en plein champ. La plupart des études des concentrations d'éléments nutritifs des sols en fonction de la distance des arbres signalent des teneurs notablement plus élevées en carbone, en azote, en phosphore et en potassium sous les canopées qu'en dehors (Belsky et al., 1989 ; Dunham, 1991 ; kamara et al., 1992 ; cité par Boffa, 2000, Mouas Bourbia, 2013, Yélémou et al., 2013). D'autres études montrent que les concentrations de cations tels que le magnésium, le calcium et le potassium, ainsi que la capacité d'échange cationique(CEC) sont également plus élevées sous couvert (Isichei et al., 1992 ; Belsky et al., 1993 ; cité par Boffa, 2000, Mouas Bourbia, 2013). En général, les concentrations de ces éléments diminuent à mesure qu'on s'éloigne de l'arbre et que la profondeur du sol augmente.

1.3. Conclusion

La comparaison des propriétés du sol sous la cime d'arbres isolés avec celles du sol environnant sans couvert d'arbres apporte de nouvelles preuves des effets des ligneux sur la fertilité des sols. Sous climats semi-arides, il est courant de trouver des teneurs plus élevées en matière organique et en éléments nutritifs sous les cimes des arbres que sur le terrain découvert avoisinant.

Les interactions biophysiques entre les arbres et les cultures, qui ont façonné la configuration des systèmes de cultures intercalaires, représentent l'un des facteurs fondamentaux qui déterminent la façon dont les agriculteurs gèrent les arbres dans leurs champs.

Chapitre II : Présentation de la zone d'étude

2.1. Situation géographique

La zone d'étude fait partie de la plaine des Bordjias. Cette plaine est située au Nord-ouest d'Algérie. Elle est limitée à l'Est par les monts d'Ennaro, Zaimia et de Beiod, à l'Ouest par la plaine de la Macta, au Nord par le plateau de Mostaganem et au Sud par la plaine de l'Habra (cf. fig.01). Elle couvre une superficie d'environ 25 000 hectares (Anonyme, 2013).

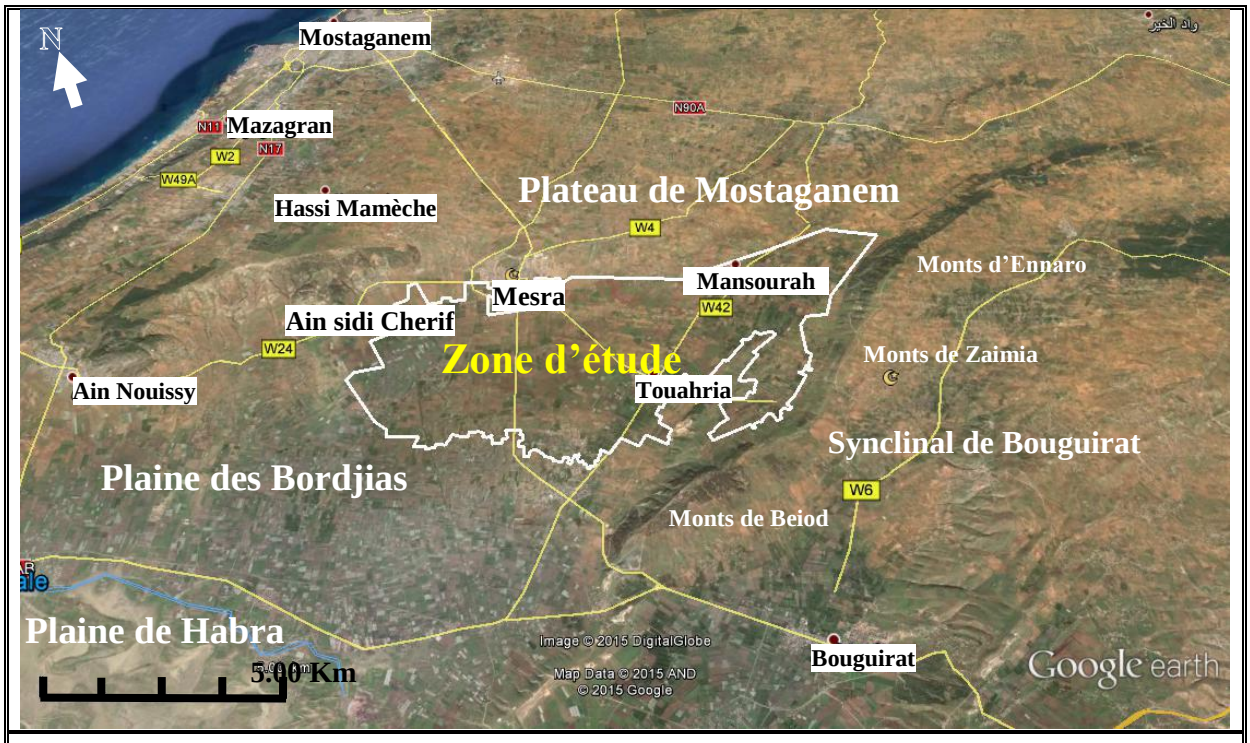


Fig. 01. Situation de la zone d'étude (Extrait de Google Earth, 2015)

2.2. Situation administrative

La zone d'étude est située à 13 Km au Sud-ouest du chef-lieu de la wilaya de Mostaganem. Elle s'étend sur 5 300 ha (DSA, 2015), et chevauche sur quatre communes : Mesra, Ain Sidi Cherif, Touahria et Mansourah (DRE, 2015). Elle est limitée :

- Au Nord par les daïras de Kheir-eddine et d'Ain Tedles ;
- A l'Est par la daïra de Bouguirat;
- Au Sud par la daïra de Bouguirat;
- A l'Ouest par la daïra de Hassi Mamèche (DTP, 2014).

2.3. Caractéristiques climatiques

L'observation du climat de la zone d'étude est effectuée sur la base des données de la station climatique de l'office national météorologique de Mostaganem (ONM) (cf. tab.02). Ces données climatiques couvrent une période de vingt-deux ans, allant de 1990 à 2012.

Tab. 02. Coordonnées géographiques de la station météorologique de Mostaganem

Station	Longitude	Latitude	Altitude
Mostaganem	00°07̀E	35°53̀N	137m

2.3.1. Pluviométrie

Elle joue un rôle crucial dans le développement et la répartition de la vie végétale. Les précipitations et la température sont les principaux facteurs déterminants du climat de la planète et, par conséquent, de la répartition des types de végétation. Il existe une étroite corrélation entre les précipitations et la biomasse puisque l'eau est l'un des principaux intrants de la photosynthèse (OMM, 2005). L'analyse pluviométrique de la zone d'étude déduite à partir des précipitations (cf. fig. 02) est résumée par les points suivants (cf. annexe 01):

- Le module moyen annuel pour la station de Mostaganem durant la période 1990-2012 est de 378,13 mm.
- Le mois de novembre est le mois le plus pluvieux (69,61mm) sur une moyenne de vingt-deux ans.
- Le mois de juillet enregistre la plus faible pluviosité dans l'année avec une pluviométrie égale à 1,73 mm.
- Les maximas sont enregistrés du début novembre à fin février, et représentent 60,29% de la pluviométrie annuelle.

2.3.2. Températures

Avec les précipitations, la température est le principal facteur déterminant du climat et, partant, de la répartition de la végétation et de la pédogenèse. Celle-ci est le produit de nombreux facteurs dont la roche-mère, la topographie, le climat, l'activité biologique et la durée. Le climat interne du sol (pédoclimat), est relié au climat général par les flux de chaleur, dépendant des

saisons, et par les précipitations ; mais, à cause des constituants et des propriétés du sol, il atténue ou amplifie les caractères de ce dernier (Gobat et al., 2010).

La température élevée est enregistrée au mois de juillet et août au niveau de la station de Mostaganem (cf. fig.02). Elle atteint 26,22°C sous abri durant le mois d'août, ce qui correspond à une forte évaporation. La température moyenne la plus faible est enregistrée durant le mois de janvier (10,89°C) (cf. annexe 01). En cas de forte chaleur ou sécheresse, la protection des arbres peut réduire l'évaporation du sol et la transpiration de la culture. Les cultures se dessèchent moins rapidement et consomment moins d'eau qu'en situation de culture pure. Ceci affecte positivement la vie dans le sol pour une construction de la structure et une amélioration du bilan organique (Mrabet et al., 2012).

2.3.3. Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen

Le diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen permet de calculer la durée de la saison sèche et la saison humide. Bagnouls et Gaussen (1953), considèrent qu'un mois est sec quand le total des précipitations exprimées en millimètres est inférieur ou égal au double de la température. Cette allure permet de constater que la période sèche s'étale sur le long de l'année avec une intense sécheresse de sept mois, allant du mois d'avril au mois d'octobre. Cette période se caractérise par une forte évapotranspiration avec des irrigations intense pour satisfaire les besoins en eau des cultures (cf. fig.02).

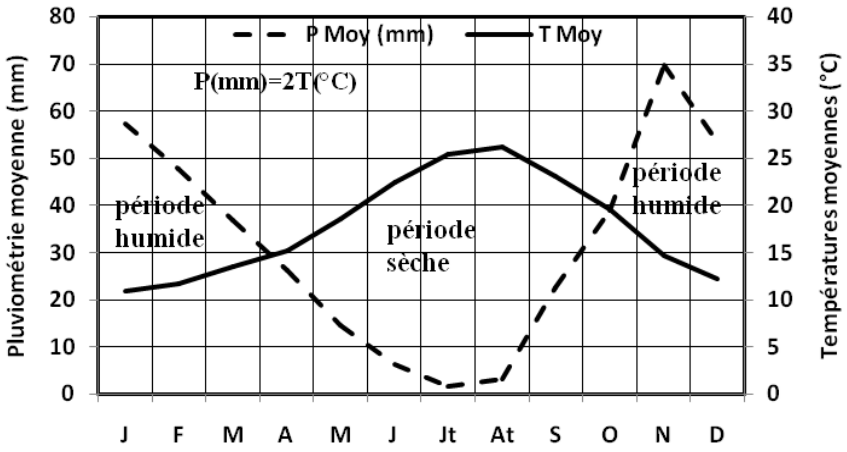


Fig.02. Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen

2.3.4. Le quotient pluviométrique et le climagramme d'Emberger

Ce quotient nous permet de déterminer l'ambiance bioclimatique d'une région, en faisant intervenir les précipitations, les températures maximales et minimales selon la formule suivante :

$$Q_2 = \frac{1000 \times P}{\frac{(M+m)(M-m)}{2}} = \frac{2000 \times P}{M^2 - m^2}$$

Q_2 : Indice pluviométrique d'Emberger.

P : Pluviométrie moyenne annuelle (mm).

M : Moyenne des températures maximales du mois le plus chaud (°K).

m : Moyenne des températures minimales du mois le plus froid (°K).

Tab. 03. Le quotient d'Emberger de la zone d'étude		
Station	**Période (1990-2012)**	
	Q_2	**m (°C)**
Mostaganem	48,87	5,61

Selon le climagramme d'Emberger (cf. fig. 03), le climat de la zone d'étude est de type méditerranéen, caractérisé par des périodes prolongées de beau temps, alors que celles des périodes tempérées sont relativement courtes. D'après le coefficient pluviométrique d'Emberger (Q_2) faisant intervenir les précipitations et des températures maximas et minimas (cf. tab.03), notre zone d'étude appartient à l'étage bioclimatique semi-aride à hiver doux. Cet étage est caractérisé par une saison estivale chaude prolongée, les pluies sont irrégulières et tombes essentiellement en hiver, sous forme de violentes averses de courte durée, accompagnées de vents forts et fréquents.

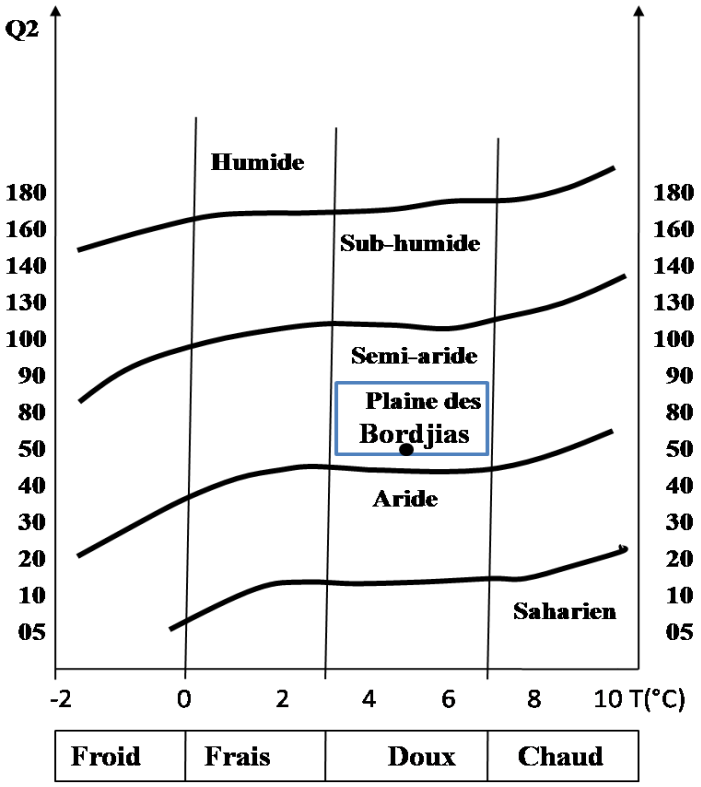


Fig. 03. Localisation de la zone d'étude dans le climagramme d'Emberger

2.3.5. Humidité relative

Le degré d'humidité de l'air dépend de la quantité d'eau qui s'y trouve. L'humidité joue un rôle important en matière d'apport de vapeur d'eau pour le sol et la végétation (Doucet, 2010). Sous l'arbre, l'humidité est plus importante qu'en plein champ, les micro-organismes sont donc probablement plus présents (Dupraz et al., 2011).

L'humidité relative de l'air est généralement plus élevée en hiver qu'en été. Ceci semble lié aux variations de la température (cf. fig.04).

Le degré hydrométrique au niveau de la zone est relativement fort avec 76,33% en moyenne (cf. annexe 01), Cela est dû à la proximité de la zone avec la mer.

2.3.6. Vents

Le vent est considéré parmi les éléments les plus caractéristiques du climat, il favorise la dégradation du sol et dessèche la végétation. Les vents jouent un rôle essentiel dans le transport et la distribution de la chaleur et de l'humidité (Doucet, 2010). Le régime annuel des vents de la zone d'étude est caractérisé par :

- Des vents dominants proviennent essentiellement du Nord (35,7%), de l'Est, suivis par ceux de l'Ouest (27,5%), de Sud-ouest et de Nord-est;
- La vitesse maximale de ces vents varie entre 2,80 et 3,20 m/s (cf. fig.04, cf. annexe 01).

Le sirocco, vent très chaud et très sec soufflant du Sud au Nord souvent associé à des particules des sables et de terres fines, apparaissant lorsque les basses pressions régissent sur la Méditerranée. Les jours de sirocco sont rares pendant la saison estivale dans notre zone d'étude.

Dans les régions semi-arides ou arides, des vents violents risquent d'emporter une grande quantité de la couche superficielle du sol en l'absence d'une couverture végétale. Cette dernière abrite les particules les plus fertiles, des obstacles au vent sous la forme de rangées d'arbres ou d'arbustes permettent de limiter cette érosion. Ces rangées soulèvent littéralement le vent et protègent donc l'espace derrière elles. Il reste un peu de vent qui souffle à travers les rangées, mais sa force est réduite et il emporte moins de particules du sol avec lui. Du fait qu'il y ait moins de vent, l'humidité de l'air et du sol reste à un niveau plus élevé réduisant ainsi l'évapotranspiration. C'est particulièrement important dans les zones sèches qui manquent d'eau (Schöl, 2005).

2.3.7. Insolation

Le paramètre insolation, sous notre climat, atteint son maximum en été et son minimum en hiver (cf. fig.04) ; il varie en outre avec la couverture nuageuse. Le maximum d'ensoleillement est relevé durant le mois de juillet avec une côte de 322,15 h (durée totale d'insolation pour le mois de juillet), soit 10,39 h/d (durée moyenne pendant la journée) ; le minimum d'ensoleillement est observé en décembre pour une côte de 175 h (durée totale d'insolation pour le mois de décembre), soit 5,64 h/d (cf. annexe 01).

Les arbres protègent, produisent et en projetant leur ombre sur l'homme et les animaux et abritent contre les vents violents, le soleil ardent et les pluies torrentielles. Mais il n'y a pas que l'homme et les animaux qui bénéficient de cette fonction protectrice, il y a aussi les cultures associées, le sol et la totalité de l'environnement qui en bénéficient (Verheij, 2005).

2.3.8. Evapotranspiration

L'évaporation est un phénomène physique ayant une relation avec la température, la sécheresse de l'air, et l'agitation de l'air (OMM, 2005).

Le maximum d'évapotranspiration est enregistré en mois de juillet (160,78 mm), le minimum en mois de janvier (55,40 mm) (cf. fig.04). Cette évapotranspiration est importante pendant la saison estivale ; du faite que la température est forte (cf. annexe 01).

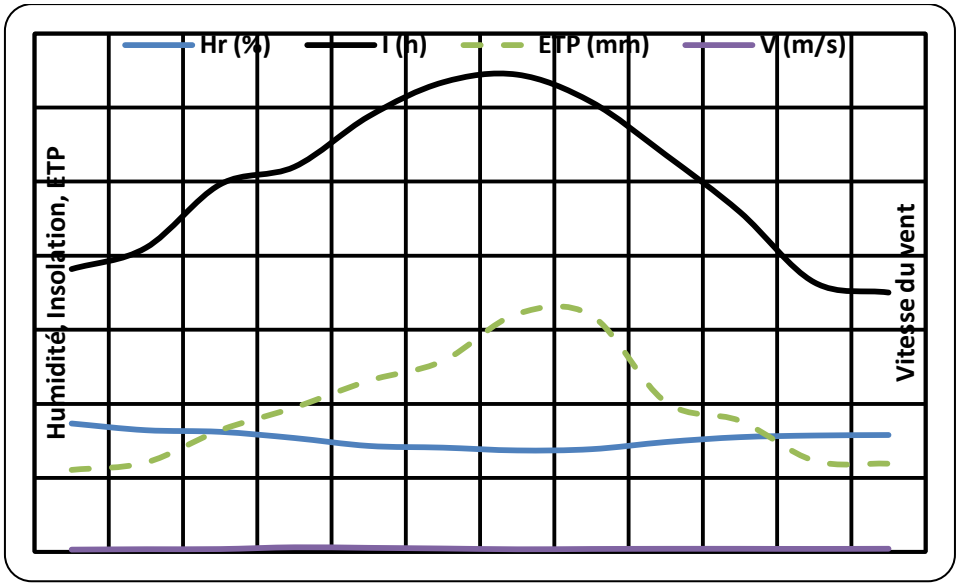


Fig. 04. Humidité de l'air, vitesse du vent, insolation et ETP (1990-2012)

2.3.9. Gelées

Le problème des gelées est important pour les cultures surtout maraîchères. Les gelées sont liées aux températures. Sur le littoral où les températures d'hiver sont relativement élevées avec 8°C en moyenne, les gelées restent un phénomène exceptionnel.

2.3.10. Brouillard

D'après l'ONM, le brouillard se manifeste avec des fréquences très faibles ne dépassent pas 1 à 3 jours par mois avec une totalité de 20 jours durant l'année. Son maximum a été observé pendant le mois d'octobre avec 8 jours de brouillard.

2.4. Caractérisation du milieu

2.4.1. Géomorphologie

D'un point de vue géologique, la zone d'étude est située dans la partie instable du bassin miocène Nord-Tellien (Boulaine, 1955). D'après la carte géologique au 1/200 000 de Bosquet, la zone d'étude est formée par des alluvions sablonneux (zone Mesra, Mansourah et Touahria), et des carapaces calcaires (zone Ain Sidi Cherif) du quaternaire (cf.fig.05) .

L'étude géologique de la zone d'étude a mis en évidence une structure constituée par un quaternaire représenté à sa base par une formation lumachellique transgressive sur les terrains sous-jacents d'épaisseur comprise entre 15 et 20 m attribuée au Calabrien (Boursali, 2008). Cette formation est surmontée par un Post-villafranchien caractérisé par des dépôts d'argiles ou des carapaces calcaires et des sables limoneux.

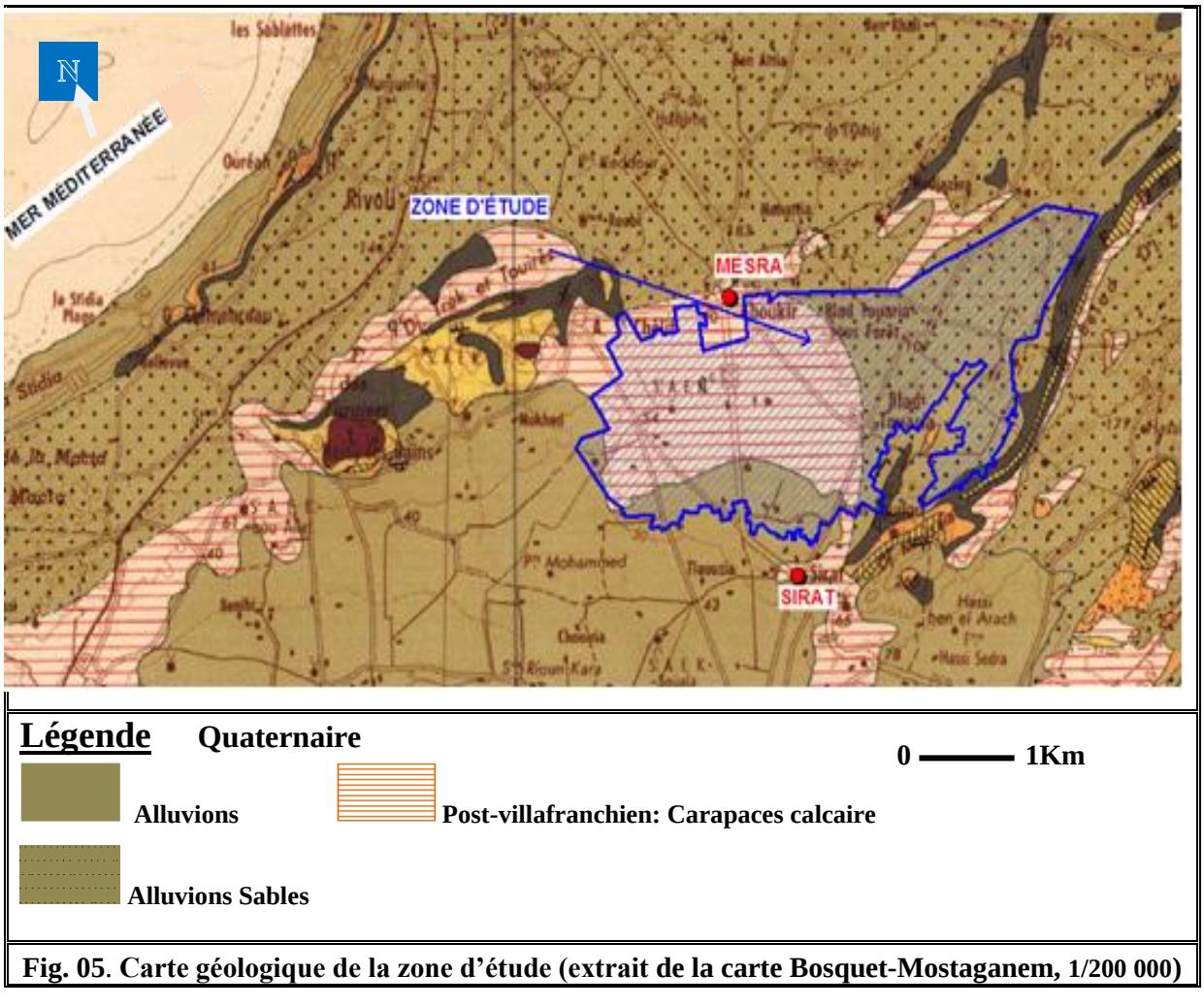


Fig. 05. Carte géologique de la zone d'étude (extrait de la carte Bosquet-Mostaganem, 1/200 000)

On peut distinguer dans cette zone un type de formation géomorphologique d'alluvions. Il s'agit de formations déposées par les petits oueds qui coulent dans cette zone. La texture variable de ces alluvions est sous la dépendance de la lithologie de l'avant pays drainé vers la plaine, provenant de la désagrégation des grés pliocènes (sables du plateau de Mostaganem). Ces dépôts sont localisés

dans la zone de Mesra, Mansourah et de Touahria au pied des monts d'Ennaro, Zaimia et de Beiod à l'Est de la zone d'étude.

Dans les zones basses (zone d'Ain Sidi Cherif), les alluvions deviennent plus argileuses ; les sols sont de texture moyenne à fine ou ils présentent un encroûtement calcaire dur en profondeur ou présentant une accumulation de calcaire sous forme de nodules ou d'amas apparaissant vers 60cm de profondeur.

2.4.2. Hydrogéologie de la zone d'étude

La zone d'étude, appartient à l'unité hydrogéologique, reconnu par la portion Nord-Est de la nappe de la plaine des Bordjias. Dans cette zone, il y'a une distinction de deux aquifères :

2.4.2.1. Aquifère principal

Il est constitué principalement du Calabrien transgressif, est discordant sur les dépôts continentaux du Mio-Pliocène. C'est le niveau aquifère le plus perméable dans cette zone.

2.4.2.2. Aquifère de la plaine des Bordjias

C'est une nappe semi-captive constituée de séries gréso-sableuses recouvertes d'alluvions. Elle est utile pour l'irrigation et localement pour les besoins d'alimentation de quelques habitations éparses (Benzian, 2009).

2.4.3. Pédologie de la zone d'étude

La zone d'étude se caractérise principalement par des sols de texture sablonneuse, limoneuse ou limono-argileuse constitués d'alluviaux. Ces sols sont regroupés dans différentes classes pédologiques, dont les plus importantes sont :

2.4.3.1. Sols alluviaux

Les alluvions des oueds forment des sols profonds, sablonneux, limoneux ou argileux généralement très riches. Ces sols peuvent porter des cultures très riches et sont souvent irrigués. De ce fait, la composition de matériaux alluvionnaires est souvent très indépendante des matériaux constituants les formations des pentes qui complètent le paysage (Boulaine, 1955).

Du point de vue environnemental, les impacts liés à l'agroforesterie sont nombreux, et surtout, ils sont tous positifs. Une parcelle de ce type vient renforcer la dynamique agro-écologique due à la présence des arbres en contribuant à la protection contre l'érosion et la fertilisation des sols, à l'amélioration de la biomasse, à la sauvegarde de la biodiversité et à la protection des eaux souterraines (Liagre, 2011).

2.4.3.2. Sols à encroûtement calcaire, sont des sols gris à noir riches en matières organiques et qui possèdent un horizon calcaire très dur, renfermant des géodes terreux (Boulaine, 1955).

2.5. Agriculture

La mise en valeur de la zone varie ; les sols, les reliefs et la technicité de la population entrent en jeu pour réaliser des « paysages agricoles » peu différents.

Le maraichage, la céréaliculture et l'arboriculture fruitière ainsi que les fourrages sont les signes d'une utilisation agricole des terres de la zone d'étude. Les terres cultivées dans cette zone occupent une superficie importante d'environ 3 800 ha soit 71,70% de la surface totale (DSA, 2015).

Conformément à l'approche de l'agroforesterie, n'importe quelle plante peut être cultivée et n'importe quel animal domestique peut être élevé. Toutefois, il faut baser la sélection des plantes sur une connaissance des cultures, des adaptations et de l'utilisation des produits ainsi que sur les besoins locaux et le marché (Mrabet et al., 2012).

Associer arbres et cultures ou arbres et élevage était monnaie courante par le passé. Contrairement à ce que l'on peut penser spontanément, la concurrence arbre/ culture n'est pas forcément à éviter. Dans toutes les études scientifiques menées en milieu tempéré, semi-aride et aride, l'association se révèle plus productive que la séparation des cultures et des arbres. Ainsi, une parcelle agroforestière peut produire jusqu'à 60% de biomasse de plus, en comparaison avec un assolement de cultures pures. Une compétition pour la lumière, l'eau et les éléments nutritifs bien gérée permet une production agricole soutenue et une productivité accrue des arbres, mieux ancrés dans le sol (Dupraz et al., 2011 et CEP, 2012).

L'association des arbres aux activités agricoles, judicieusement organisée dans l'espace et dans le temps, permet d'instaurer des relations de complémentarité. Un cycle se met en place entre les éléments du climat, de la biodiversité du sol, de l'eau, les cultures, les animaux et les arbres, au bénéfice de la production et des paysages (Anonyme, 2009).

Néanmoins, l'érosion qui apparaît de façon distincte sur les rebords Nord et Est de la zone d'étude est le signe d'une mauvaise exploitation des ressources naturelles ; ce qui a rendu possible le développement des phénomènes de dégradation des terres agricoles.

Les matières organiques jouent un rôle important dans le fonctionnement global du sol au travers de ses composantes physiques, biologiques et chimiques, qui ont des conséquences majeures pour la fertilité des sols (amélioration de la structure des sols) (Huber et al., 2011). Elles régulent les activités biologiques et contribues à la diversité, à la stabilité et à la complexité des sols (Genot et al., 2009).

Les paysans reconnaissent que les racines des arbres participent à limiter l'érosion hydrique en freinant les eaux de ruissellement par leurs racines superficielles. Elles protègent ainsi les particules du sol, selon leur taille et leur forme. Les paysans expliquent qu'elles permettent également d'aérer le sol par les fissures qu'elles provoquent dans le sol. De plus, elles participent à l'enrichissement des sols par la décomposition des écorces des racines dans les sols (Blanchard, 2010). Il s'agit des méthodes que l'agriculteur peut utiliser avant, pendant et après la période de croissance et qui n'exigent pas l'addition d'un nouvel élément à son exploitation, ni l'achat de nombreux investissements supplémentaires. Ces méthodes comprennent le paillage, l'apport d'engrais vert, les cultures associées, les périodes de jachère verte et l'agroforesterie. Les cultures associées et l'agroforesterie permettent le développement de systèmes radiculaires étendus dans le sol ; la plantation de différentes plantes aux systèmes radiculaires différents, nécessitant des substances nutritives différentes, favorise une meilleure utilisation des substances nutritives présentes et de l'eau. Les arbres qui constituent une partie des systèmes d'agroforesterie, permettent l'utilisation des substances nutritives situées dans des couches plus profondes du sol (Schöl, 2005).

2.6. Conclusion

La zone d'étude fait partie de la plaine des Bordjias, elle est caractérisée par un climat méditerranéen semi-aride avec une longue période de sécheresse, une évapotranspiration de référence moyenne annuelle de 1171,32 mm sur une période de 22 ans et une pluviométrie moyenne annuelle de 378,13 mm insuffisante pour satisfaire les besoins en eau des cultures.

Les terres cultivées dans cette zone occupent une superficie importante à dominance maraichère. Ensuite, arrivent la céréaliculture, l'arboriculture fruitière, ainsi que les fourrages.

Néanmoins l'érosion (hydrique et/ou éolienne) qui apparaît de façon distincte sur cette zone est le signe d'une mauvaise exploitation des ressources naturelles et de l'aménagement du territoire ; ce qui a rendu possible le développement des phénomènes de dégradation des terres agricoles.

L'agroforesterie, la rotation des cultures, les engrais verts, le couvert végétal sont, avec la mise en défense des pâturages, les seules techniques d'amélioration possibles des sols dans cette zone.

Chapitre III : Etude expérimentale

3.1. Matériels et méthodes

3.1.1. Choix des sites

Pour le choix des nos sites expérimentaux (cf. fig.06, planche 01), nous avons pris en considération la présence des espèces ligneuses réparties longitudinalement le long de la parcelle avec des espaces bien déterminés selon l'espèce où on prévoie une combinaison avec des cultures intercalaires.

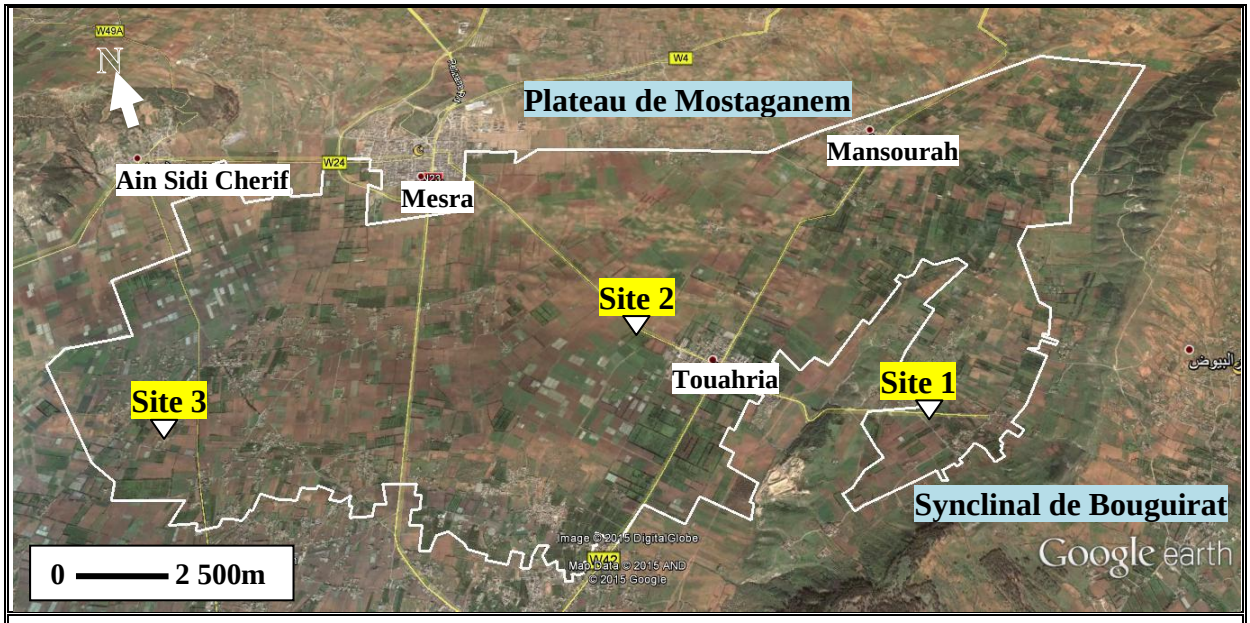


Fig. 06. Situation des sites expérimentaux (Extrait de Google Earth, 2015)

3.1.1.1. Situation des sites expérimentaux

Tab.04. Position des sites par rapport au Chef-lieu

Site	Superficie (ha)	Chef-lieu	Distance (km)	Direction
01	1,2	Touahria	5	Sud-est
02	1,3	Touahria	0,20	Ouest
03	1,5	Ain Sidi Cherif	4	Sud

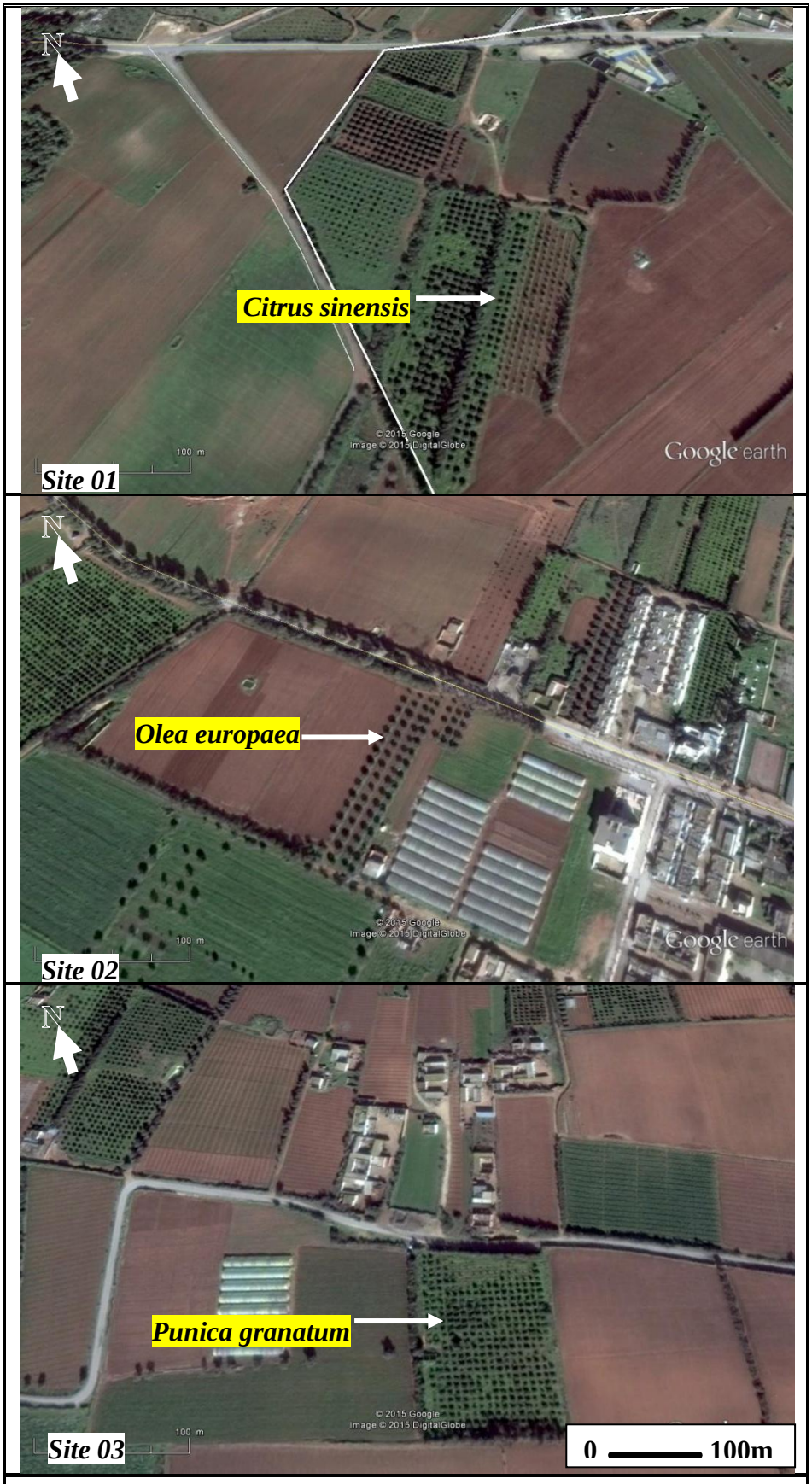


Planche 01. Sites expérimentaux (Extrait-Google Earth, 2015)

3.1.2. Matériels

3.1.2.1. Caractéristiques des ligneux

A. Site 01

De la famille des Rutacées, *Citrus sinensis* (cf. planche 02), est un arbre du genre *Citrus*, peut atteindre environ 08 m de hauteur, avec des branches épineuses, des feuilles luisantes de 4 à 10 cm de long et des fleurs blanches au parfum délicat. Le fruit est une baie, contient de nombreuses graines et dérivent d'un ovaire unique (Burnie et al, 2005).

Les agrumes sont originaires d'Asie subtropicale et plus particulièrement d'une zone allant du Nord-est de l'Inde jusqu'au Nord de l'Indonésie, en passant par le Myanmar (Birmanie) et le Sud de la Chine (Jacquemond et al., 2013).

L'oranger a été introduit dans le bassin méditerranéen vers la moitié du XIIe siècle (Walali et al., 2003). La culture des agrumes est possible partout où la température moyenne de l'année est supérieure à 13°C et inférieure à 39°C. Les agrumes préfèrent les climats maritimes des zones subtropicales.

Les agrumes sont très sensibles aux conditions de sol asphyxiantes, préjudiciables à la respiration des racines. Ainsi, les arbres se développent mieux dans des sols profonds et de préférence légers (sablo-argileux ou argilo-sableux) en surface, où le travail du sol et le développement des racines sont facilités, et dans un sous-sol de terre franche et riche avec une bonne perméabilité (Jacquemond et al., 2013). Le pH idéal est situé entre 5,5 et 7,5 (Walali et al., 2003). En terme de besoins en eau, 2500 à 5000 m^3/an/ha, représentent une quantité d'eau au-dessous de laquelle la culture des agrumes nécessite une irrigation (ITAB, 2005).

B. Site 02

De la famille des Oléacées, *Olea europaea* (cf. planche 02), est un arbre du genre *Olea*, peut atteindre environ 09 m de hauteur, caractérisés par des feuilles ovales ou ovales lancéolées, 2 à 5 fois plus longues que larges. Inflorescences en grappes denses axillaires et au sommet de rameaux courts, denses, à fleurs subsessiles. Fruit drupiforme à noyau épais, coriace et résistant (Burnie et al, 2005).

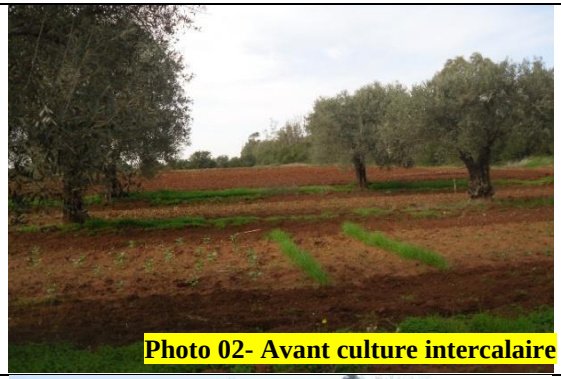
Olea europaea, est un arbre caractéristique du bassin méditerranéen, originaire d'un climat subtropical sec. Il peut s'adapter à des sols relativement pauvres. Ils doivent néanmoins être suffisamment légers (moins de 20% d'argile), drainants et d'une profondeur de 1,5 m au minimum. En revanche, il ne supporte pas les sols hydromorphes (il craint l'asphyxie racinaire), trop riches en sel ou trop alcalins (pH supérieur à 8,5) (Adgie et al., 2011).

C. Site 03

De la famille des *Punicaceae, Punica granatum* (cf. planche 02), est un arbuste ou petit arbre touffu du genre *Punica*, haut de 4 à 5 m sur 3 m de large, légèrement épineux, au feuillage caduc et au tronc tortueux. Ses fleurs rouge vif mesurent 3 cm de diamètre (Burnie et al, 2005). Ses fruits, les grenades, contiennent en moyenne 600 graines pulpeuses. La grenade est une grosse baie ronde, de la taille d'une grosse orange, à écorce dure et coriace, de couleur rouge orangé à maturité, qui renferme de nombreux pépins de couleur rose à rouge. Seuls ses pépins sont comestibles, soit environ la moitié du fruit. Dans chaque pépin, la graine est enrobée d'une pulpe gélatineuse de chair rouge transparente, sucrée chez les variétés améliorées, sinon d'un goût plutôt âcre (Mars, 1993).

*Punica granatum***,** est une espèce venant de l'Asie, où il vit toujours à l'état sauvage. Cultivé depuis plus de 5000 ans, il a gagné l'Inde puis la Chine, le bassin méditerranéen et enfin le nouveau Monde (Santich et al., 2013).

Les grenadiers s'adaptent à une large gamme de climats, des tropiques aux régions tempérées chaudes, mais ne mûrissent leurs fruits que s'ils bénéficient d'un long été chaud et sec. Ils donnent de meilleurs résultats dans un terrain profond et bien drainé (Burnie et al, 2005).

Site 01	**Photo 01- *Citrus sinensis***	**Photo 02- Avant culture intercalaire**	**Photo 03- Après culture intercalaire**
Site 02	**Photo 01- *Olea europaea***	 **Photo 02- Avant culture intercalaire**	**Photo 03- Après culture intercalaire**
Site 03	**Photo 01- *Punica granatum***	**Photo 02- Avant culture intercalaire**	**Photo 03- Après culture intercalaire**
	Planche 02. Système agroforestier de chaque site expérimental (Photos- D. Fettouch, 2014-2015)		

3.1.2.2. Culture intercalaire

L'espèce cultivée en association avec les ligneux, est dite « *Vicia faba* » (cf. fig. 07), de la famille des Fabacées et du genre *Vicia*. C'est une espèce à feuilles dépourvues de vrilles. C'est une annuelle dressée, de 75 cm de hauteur en moyenne, à tiges robustes garnie d'un feuillage grossier vert grisâtre. Les fleurs blanches, rouge chez certains cultivars, à macule centrale noirâtre, groupées en bouquets à l'aisselle des feuilles supérieures (Burnie et al, 2005), sont suivies de grandes gousses duveteuses, pouvant atteindre 30 cm de longueur (Santich et al., 2013).

La fève (*Vicia faba*), probablement originaire du bassin méditerranéen ou d'Asie du Sud-ouest (Santich et al., 2013), c'est une espèce de saison froide qui peut être cultivée comme légume vert ou à l'état sec après la maturité des gousses. Elle est sensible au manque d'eau et exige une alimentation hydrique régulière supérieure à 350 mm/an (Bennasseur, 2005). La culture de fève est peu exigeante en termes de qualité de sol, cependant, elle aime les sols argilo-calcaires gardant bien la fraîcheur (Pousset, 2011).

Fig. 07. Culture intercalaire (*Vicia faba*)
(Photo- D. Fettouch, 2015)

3.1.3. Méthodes

Après avoir choisi les sites d'étude, nous avons opté pour une approche méthodologique basée sur une enquête sur le terrain et une approche expérimentale visant à étudier les caractéristiques physico-chimiques et hydriques des sols en relation quelques systèmes agroforestiers pratiqués dans la zone d'étude.

3.1.3.1. Entretien

Des entretiens ont eu lieu avec les agriculteurs chez qui les sites expérimentaux ont été choisis afin d'obtenir quelques précisions sur les itinéraires techniques réalisés (cf. annexe 02).

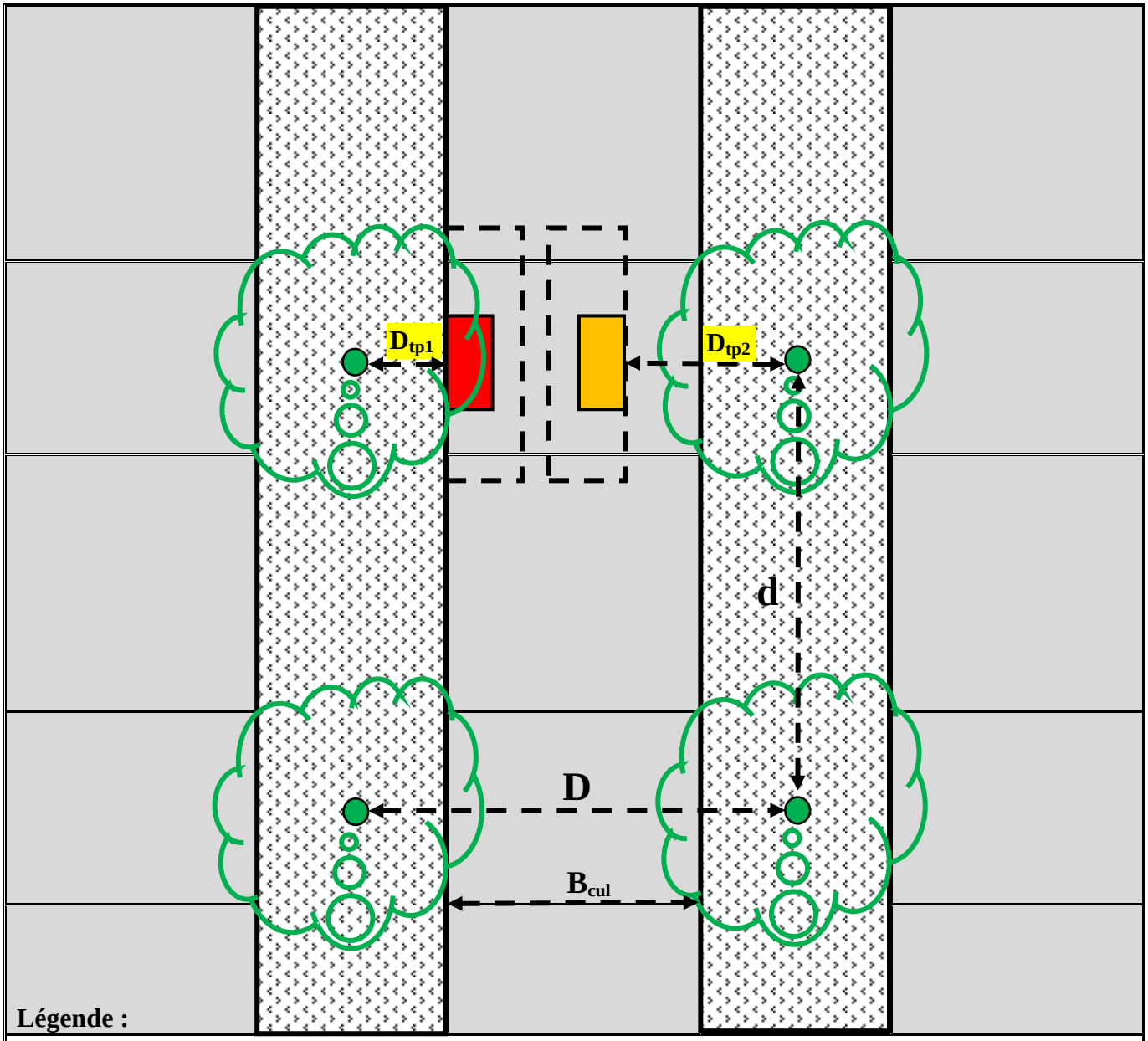
3.1.3.2. Caractéristiques des espèces ligneuses

Pour caractériser les espèces ligneuses, les paramètres suivants ont été enregistrés : la hauteur de l'arbre, la forme de houppier et le diamètre de la projection de la couronne au sol dans deux directions (Nord-sud et Est-ouest) (cf. annexe 02).

3.1.3.3. Approche expérimentale

Nous avons choisi dans chaque site expérimental un arbre. Dans les trois sites, trois pieds d'arbres ont été choisi pour cette étude (cf. fig.08). Dans la direction cardinale Sud, de chaque arbre, des placettes de $3m^2$ (3m x 1m) ont été disposées comme suit: la première à une distance de 1 m du tronc de l'arbre et la deuxième au milieu (entre les arbres). C'est dans ces placettes que se sont effectués des prélèvements de sol, le suivi de la croissance et estimation

du rendement de la fève. Pour le choix de la deuxième placette (au milieu), nous avons pris en considération la possibilité de disposer les différentes placettes de suivi sans influence d'un autre pied avoisinant.



Légende :

Surface cultivée	D_{tp}	Distance entre tronc et placette 1 & 2	
Bande non cultivée	D	Distance entre les lignes d'arbres	
Placette d'observation (3 x1 m)	d	Distance entre les arbres de la ligne	
Profil cultural sous l'arbre	B_{cul}	Largeur de la bande cultivée	
Profil cultural entre les arbres		Tronc de l'arbre	Houppier

Paramètres / Systèmes	D (m)	d (m)	D_{tp1}(m)	D_{tp2} (m)	B_{cul} (m)
Citrus sinensis / *Vicia faba*	5	5	1	2	3
Olea europaea / *Vicia faba*	8	5	1	3,5	6
Punica granatum / *Vicia faba*	10	4	1	4,5	8

Fig. 08. Dispositif expérimental

3.1.3.4. Échantillonnage

L'échantillonnage a été réalisé en novembre 2014, c'est à dire avant la mise en place de la culture et quelques jours après la récolte de la fève (avril 2015) afin d'analyser les résultats obtenus avec cette méthode d'échantillonnage.

On a creusé devant chaque pied de l'arbre, à une distance de 1 m et au milieu (entre les arbres) un profil cultural de 50 cm de profondeur (cf. planche 03), soit 12 profils au total.

❖ **Délimitation des horizons**

A l'aide d'un couteau, on a délimité les horizons qui sont identifiés par leur couleur, leur structure et leur compacité.

❖ **Description des profils**

Nous avons identifié les racines par leur répartition et leur abondance ainsi que la direction de leur pénétration, nous avons rempli des fiches de description (cf. tab. 05, 06,07, annexe 03). Les prélèvements de sol de l'horizon sont effectués pour chaque profil et le nombre de prélèvements varie selon les profils.

3.1.4. Caractérisation des sols

La réalisation d'un profil cultural permet d'évaluer avec une bonne précision la structure du sol dans la couche arable ainsi que dans la couche sous-jacente. Le profil cultural permet de vérifier l'incidence des pratiques culturales sur l'enracinement des cultures, sur la vie du sol et sur l'agencement des états structuraux dans les différents horizons de la couche arable.

Paramètres		Site 1	Site 2	Site 3
Coord. Géogr.	Longitude	0° 13'44.18'' E	0° 12'12.37'' E	0° 8'35.23'' E
	Latitude	35° 48'10.96'' N	35° 48'45.59'' N	35° 47'46.93'' N
	Altitude	128 m	80 m	48 m
Topographie		pente 1%	pente 1%	Plate
Nature du substrat		Alluvions	Alluvions	Alluvions
Etat de surface		terrain cultivé	terrain cultivé	terrain cultivé
Profil cultural à proximité de l'arbre (1m)	Avant			
	Après			
Profil cultural entre les arbres (variable)	Avant			
	Après			

Planche 03. Profils culturaux des sites expérimentaux (Photos - D. Fettouch, 2014-2015)

Tab.05. Description des profils culturaux du premier site														
Profil	**Horizon**	**Epaisseur (cm)**	**Texture**	**Eléments grossiers**	**$CaCO_3$**	**Couleur**	**Matière organique**	**Humidité**	**Porosité**	**Compacité**	**Structure**	**Faune**	**Enracinement**	**Limites entre les couches**
P_1	**H_s**	0-15	Limono-sableuse	-	faible	rouge brun sombre (5YR 3/4)	faible	moyenne	forte	faible	granulaire, friable	moyenne	moyenne	diffuse
	H_m	15-30	Sablo-limoneuse	-	faible	rouge brun sombre (5YR 3/4)	moyenne	moyenne	moyenne	moyenne	granulaire, friable	faible	forte	peu-nette
	H_i	>30	Sablo-limoneuse	-	-	rouge brun sombre (5YR 3/3)	moyenne	moyenne	faible	forte	granulaire	absence	faible	-
P_2	**H_s**	0-20	Limono-sableuse	-	faible	rouge brun sombre (5YR 3/4)	moyenne	moyenne	forte	faible	granulaire, friable	moyenne	moyenne	diffuse
	H_m	20-30	Sablo-limoneuse	-	faible	rouge brun sombre (5YR 3/4)	moyenne	moyenne	moyenne	moyenne	granulaire, friable	faible	moyenne	peu-nette
	H_i	>30	Sablo-limoneuse	-	-	rouge brun sombre (5YR 3/3)	forte	moyenne	faible	moyenne	granulaire	absence	faible	-

Tab.06. Description des profils culturaux du deuxième site														
Profil	**Horizon**	**Epaisseur (cm)**	**Texture**	**Eléments grossiers**	**$CaCO_3$**	**Couleur**	**Matière organique**	**Humidité**	**Porosité**	**Compacité**	**Structure**	**Faune**	**Enracinement**	**Limites entre les couches**
P_1	**H_s**	0-10	Sablo-limoneuse	-	faible	brun rougeâtre (5YR 4/4)	moyenne	moyenne	forte	faible	granulaire, très friable	faible	forte	diffuse
	H_m	10-30	Sablo-limoneuse	-	faible	rouge brun sombre (5YR 3/3)	moyenne	moyenne	moyenne	moyenne	granulaire, friable	faible	moyenne	peu-nette
	H_i	>30	Sablo-limoneuse	-	-	brun rougeâtre gris (5YR 4/2)	moyenne	faible	faible	forte	polyédrique	absence	forte	-
P_2	**H_s**	0-10	Sablo-limoneuse	-	faible	brun rougeâtre (5YR 4/4)	moyenne	moyenne	forte	faible	granulaire, très friable	forte	moyenne	diffuse
	H_m	10-40	Limono-sableuse	-	faible	rouge brun sombre (5YR 3/3)	moyenne	moyenne	moyenne	moyenne	granulaire, friable	moyenne	moyenne	peu-nette
	H_i	>40	Sablo-limoneuse	-	-	jaune rougeâtre (5YR 4/6)	moyenne	moyenne	moyenne	moyenne	granulaire	faible	faible	-

Tab.07. Description des profils culturaux du troisième site														
Profil	**Horizon**	**Epaisseur (cm)**	**Texture**	**Eléments grossiers**	**$CaCO_3$**	**Couleur**	**Matière organique**	**Humidité**	**Porosité**	**Compacité**	**Structure**	**Faune**	**Enracinement**	**Limites entre les couches**
P_1	**H_s**	0-10	Limono-sableuse	faible	faible	noir sombre	forte	forte	forte	faible	grumeleux, friable	forte	forte	diffuse
	H_m	10-20	Limono-sableuse	moyenne	faible	noir sombre	forte	forte	forte	faible	grumeleux à tendance polyédrique, friable	forte	forte	nette
	H_i	>20	Limono-argilo-sableuse	forte	moyenne	gris verdâtre	moyenne	forte	moyenne	moyenne	polyédrique angulaire, friable	forte	moyenne	-
P_2	**H_s**	0-10	Limono-argilo-sableuse	faible	faible	noir sombre	forte	forte	forte	faible	grumeleux, friable	forte	forte	diffuse
	H_m	10-25	Limono-argilo-sableuse	moyenne	faible	noir sombre	forte	forte	forte	faible	grumeleux à tendance polyédrique , friable	forte	forte	nette
	H_i	>25	Limono-argilo-sableuse	forte	moyenne	gris verdâtre	moyenne	forte	moyenne	moyenne	polyédrique angulaire, friable	forte	moyenne	-

3.1.5. Mise en place de la culture intercalaire (*Vicia faba*)

Les travaux de terrain ont consisté à réaliser un labour superficiel dans les trois sites expérimentaux dès le début du mois de novembre, date à laquelle les premières pluies sont tombées. Les semis se sont déroulés dans le même mois (le 18 novembre), avec des écartements de 0,40 m entre poquets et 0,40 m entre lignes avec deux plants par poquet. La récolte eu lieu la première quinzaine d'avril.

3.1.5.1. Croissance de la culture intercalaire

Dans chaque placette, était mesurée la taille des plants de la fève aux pas de temps de 15, 30, 45, 60, 75 et 90 jours après semis.

3.1.5.2. Rendement de la culture intercalaire

Le poids total des gousses, est le seul paramètre estimé, dans les deux placettes de suivi et dans les trois sites d'étude.

3.1.6. Méthodes d'analyses physico-chimiques et hydriques des sols

Nous avons étudié les propriétés physico-chimiques et hydriques du sol. Les échantillons du sol sont séchés à l'air libre, tamisés à 2mm, puis analysés au laboratoire régional de l'institut national des sols, de l'irrigation et du drainage (INSID, wilaya de Relizane).

3.1.6.1. Granulométrie

La texture correspond à la composition granulométrique d'un échantillon de terre, définie d'après la proportion des différentes particules minérales de taille inférieure à 2 mm (argiles, limons et sables) (Anonyme, 2012). Elle s'exprime par un classement de sol : le triangle des textures (cf. fig.09) permet de classer les sols d'après leur composition granulométrique (CERDI, 1992).L'analyse granulométrique a été effectuée par la méthode de la pipette de Robinson.

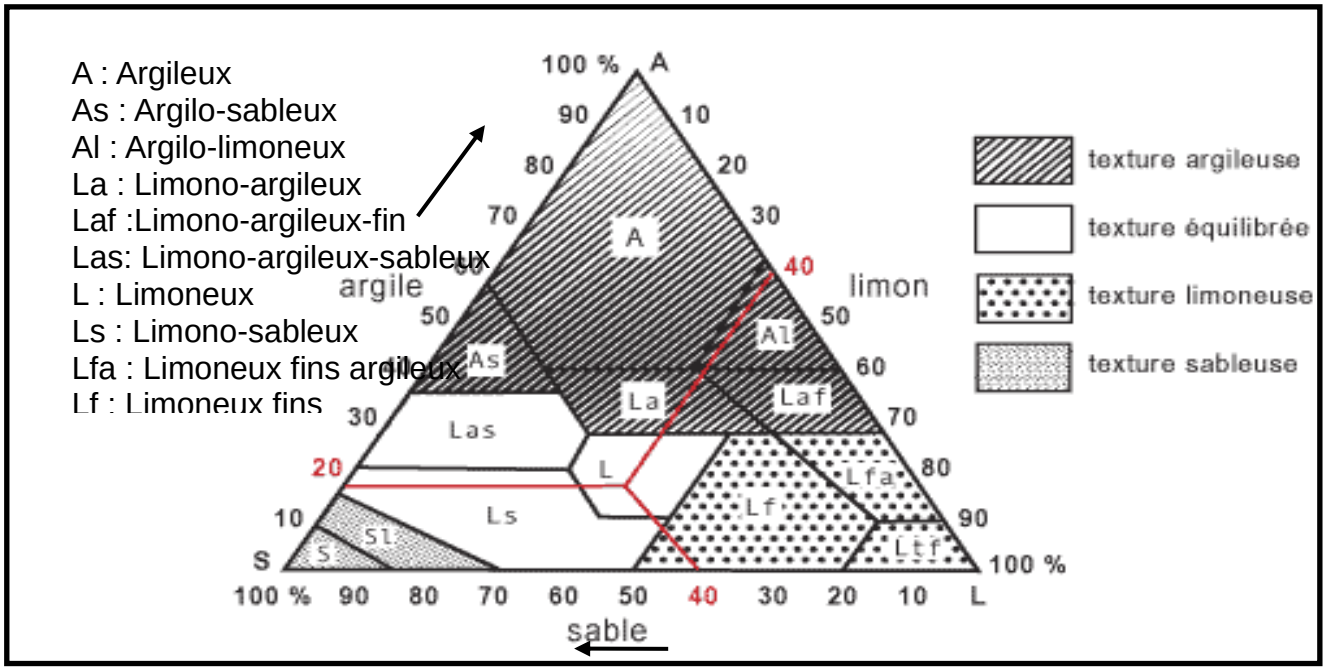


Fig. 09. Triangle des textures (d'après USDA 1976 cité par Gobat, 2010**)**

La texture d'un sol exerce une grande influence sur les autres propriétés physique de ce sol, de même que sur ses propriétés chimiques et son adaptation économique aux différentes cultures. La texture est une propriété stable sur le long terme alors que la structure varie à court terme selon la stabilité du complexe argilo-humique, l'humidité et l'activité qui peuvent fluctuer au cours des saisons (Meyer et al., 2008).

La dénomination du sol, est fonction de sa composition texturale et de son taux de calcaire total qui sont mentionnés au préalable dans le résultat des analyses du sol. A partir de la teneur en calcaire total dans le sol, on détermine le suffixe ou le préfixe qui accompagne le qualitatif textural (cf. tab 08).

Tab. 08. Dénomination du sol en fonction de sa classe texturale et sa teneur en calcaire total (Hénin, 1976)

Teneur en $CaCO_3$(%)	**<5**	**5 à 20**	**20 à 50**	**>50**
Dénomination	Normal	Suffixe« calcaire »	Préfixe« Calcaro »	Calcaire
Exemple	Argilo-limoneux	Argilo-limoneux calcaire	Calcaro- argilo-limoneux	Calcaire Argilo-limoneux

3.1.6.2. Densité apparente

C'est la mesure de la densité du sol en tenant compte qu'il y a des vides entre les particules solides du sol. Pour cela, on prélève un échantillon de sol non remanié (méthode de

cylindre), souvent cylindrique et on le pèse après séchage. La densité apparente qui est le rapport masse des constituants solides sur volume apparent :

$$da = \frac{Ms}{Va}$$

Avec ;

da : masse volumique apparente du sol (g/cm^3) ;
Ms : masse des constituants solides (g) ;
V_a : volume interne de cylindre (volume des vides et des solides) (cm^3) (Musy et al., 1991).

La densité apparente est l'un des paramètres les plus importants dans les études portant sur la structure du sol. Il est essentiel de déterminer la densité d'un sol pour connaître sa porosité et, par conséquent, sa perméabilité, ainsi la densité apparente est un critère d'appréciation de la structure des sols (Doucet, 2010).

3.1.6.3. Calcaire total

En agronomie, le calcaire est une particule minérale naturelle du sol constituée presque exclusivement de carbonate de calcium ($CaCO_3$), qui provient du matériau parental (roche), mais qui peut aussi être apporté par l'homme sous forme d'amendements minéraux basiques. Le calcaire total est obtenu par la méthode du calcimètre de Bernard et le calcaire actif par titrimétrie au permanganate de potassium.

Le calcaire est un composant basique qui intervient sur l'ensemble des propriétés physiques (structure), chimiques (biodisponibilité des éléments minéraux) et biologiques (fonctionnement de la biomasse microbienne) des sols (Anonyme, 2012).

Il faut retenir que le lien entre calcaire total et actif n'est pas automatique : une terre peut être riche en calcaire total et relativement pauvre en calcaire actif. L'excès de calcaire actif nuit à certaines plantes (par exemple les arbres fruitiers). On considère généralement que des problèmes sérieux peuvent commencer à apparaitre à partir de teneurs en calcaire actif voisines de 50‰. Mais une présence modérée de calcaire actif améliore la solidité du complexe argilo-humique et dont la stabilité de la structure du sol (Pousset, 2011).

3.1.6.4. pH

Le potentiel hydrogène (pH) exprime la teneur en hydrogène acide libre d'une solution. C'est en fait une donnée assez compliquée qu'on peut présenter et résumer par l'exemple suivant : Si le pH d'une terre est 6, cela signifie que 400g de ce sol libèrent dans un

litre de solution (eau ou KCl) un millionième de gramme d'hydrogène ; 6 étant le logarithme d'un million (Pousset, 2011).

Le pH du sol est déterminé par le pH mètre avec un rapport sol/eau de 1/2,5. Il dépend en premier lieu des possibilités de libération du sol en hydrogène acide libre, mais cette libération est contrecarrée par la présence de calcium. Un sol riche en calcaire actif et donc en calcium est d'autant plus basique que son pouvoir de libération d'hydrogène est moins grand (ce pouvoir de libération dépendant par ailleurs de la teneur en matière organique, en argile, etc.) (Pousset, 2011).

Le pH est mesuré sur une échelle allant de 0 à 14(cf. fig. 10) (Dinon et al., 2008).

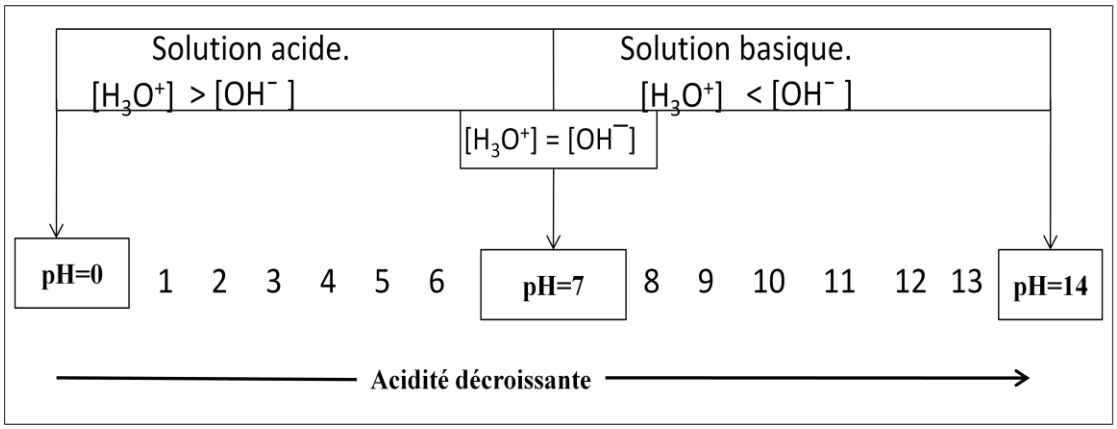


Fig.10. Échelle du pH

Le pH du sol est un indicateur des conditions physico-chimiques de la solution du sol, exerce un effet direct sur la biodisponibilité des nutriments, à travers des phénomènes de solubilisation et d'insolubilisation propres à chaque élément, comme on peut le voir dans la fig.11 (Genot et al., 2009).

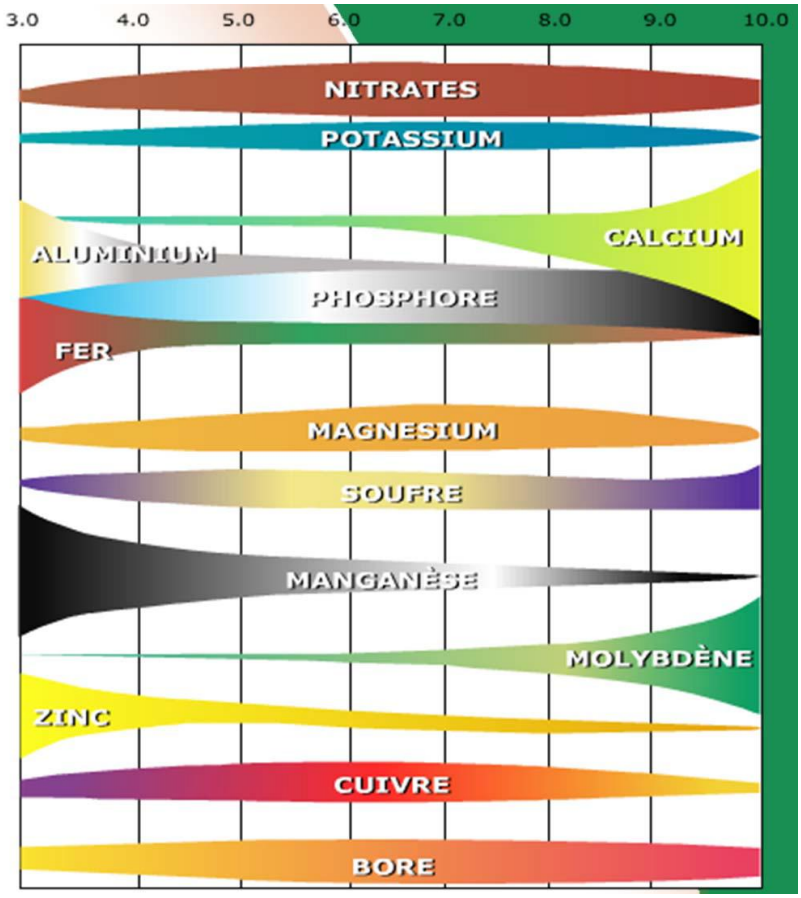


Fig.11. Diagramme d'assimilabilité des éléments minéraux en fonction du pH
(Cité par INRA, 2013)

3.1.6.5. Conductivité électrique (CE)

La conductivité électrique d'une solution est la conductance de cette solution mesurée entre des électrodes de 1 cm^2 de surface. Elle permet de déterminer la salinité globale de la solution du sol. Elle est exprimée en mmhos/cm ou dS/m (Baize, 2000). Elle est directement proportionnelle à la quantité de solides (les sels minéraux) dissous dans la solution du sol. La concentration élevée du sol en sels solubles peut empêcher la germination des semences et endommager les plantes établies. Elle nuit aussi à l'absorption de l'eau par les plantes (DAT, 2001). La conductivité électrique est mesurée par le conductivimètre électrique avec un rapport sol/eau de 1/5, ainsi l'échelle de salure (échelle européenne) est fonction de la conductivité électrique de l'extrait aqueux 1/5 :

	Non salé	Peu salé	Salé	Très salé	Extrêmement salé
CE (mmhos/ cm)	**0**	**0,6**	**1,4**	**2,4**	**6**

3.1.6.6. Carbone organique (C)

Le carbone organique est déterminé par titrimétrie selon la méthode d'Anne. Le taux de matière organique d'un sol se détermine au laboratoire, par la mesure classique du carbone total (C x 1,72 pour obtenir le taux de matière organique).

3.1.6.7. Azote total (N)

C'est l'ensemble de toutes les formes d'azote minéral et organique présentes dans un échantillon de sol, excepté l'azote gazeux. La détermination de l'azote total associée à la détermination du carbone organique, elle sert à caractériser les matières organiques et la fertilité chimique des sols (Baize, 2000).Dans notre étude, l'azote total est déterminé par la méthode de Kjeldhal.

3.1.6.8. Rapport C/N

C'est un indicateur de l'activité biologique des sols (cf. tab.09). Il renseigne sur :

- Le degré d'évolution de la matière organique (Vedie, 2008),
- L'activité biologique,
- Le potentiel de fourniture d'azote par le sol (minéralisation).

Tab.09. Activité biologique dans le sol (Boyer, 1982)

C/N	**< 9**	**9-12**	**12-25**	**> 25**
Appréciation	-Minéralisation trop rapide de la matière organique permettant une fourniture excédentaire d'Azote aux plantes.	-Minéralisation normale de la matière organique due à une bonne activité biologique.	- Processus d'accumulation de la matière organique l'emporte sur la minéralisation. -Vie microbienne ralentie. - Risque d'apparition de carence. - Nuisance à l'exploration correcte du sol par les racines.	- Arrêt de la minéralisation.

3.1.6.9. Phosphore assimilable (P_2O_5)

Le phosphore est un des éléments majeurs indispensables à la croissance et au développement des végétaux. Il joue en particulier un rôle essentiel dans la mise en place du système racinaire, la photosynthèse et la reproduction du végétal (Frossard et al., 2004).

Le phosphore assimilable est déterminé par la méthode de Jauret Hebert. Elle est considérée comme satisfaisante en sols basiques à neutres.

Dans le sol, le phosphore assimilable se trouve sous la forme d'ions phosphoriques (PO_4^{3-}) présents dans la solution du sol ou fixés au complexe argilo-humique. Connaître la teneur du sol en phosphore assimilable est indispensable pour maintenir durablement la fertilité phosphatée du sol. La proportion de phosphore assimilable dans le sol est étroitement liée au pH du sol. Selon le pH, une fraction plus ou moins importante du phosphore assimilable se combine avec d'autres éléments du sol et devient indisponible pour la plante (CERDI, 1992). En terrain calcaire, les phosphates ont tendance à être insolubilisés par le calcium (phosphates calciques et magnésiens). En terrain très acide, ils sont bloqués par le fer et l'aluminium, surtout si la teneur en argiles très élevée. Le pH optimum pour une bonne assimilation des phosphates par les plantes est compris entre 6 et 7 (cf.fig.11). Dans cette zone les composés insolubles du calcium ne peuvent pas se former et le blocage par le fer et l'aluminium est faible (Pousset, 2011).

3.1.6.10. Dosage des cations

A partir de l'extrait de la pâte saturée, les cations solubles (Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+}, Na^{+}) sont dosés par l'absorption atomique et les cations échangeables (Ca, Mg, K, Na) sont déterminés par d'absorption atomique au moyen d'un extrait d'acétate d'ammonium.

3.1.6.11. Dosage des anions

- Les anions HCO_3^- et CO_3^{2-} sont dosés par titrimétrie au H_2SO_4.
- Le Cl^- par titrimétrie au nitrate d'argent (méthode de MOHR).
- SO_4^{2-} par la méthode gravimétrique au $BaCl_2$.

3.1.6.12. Capacité d'échange cationique (CEC)

La capacité d'échange en cations d'un sol correspond à la quantité totale de cations que le sol est capable de stocker et de restituer dans des conditions de pH bien définies (Huber et al., 2011). Elle est relativement stable dans le sol puisqu'elle dépend de la texture ainsi que du taux et la qualité de la matière organique.

La CEC est un indicateur de la fertilité du sol, elle est exprimée en milliéquivalents par 100 g de sol (méq/100g) (Gobat et al., 2010).

Pour les sols non salés et non calcaires, la capacité d'échange cationique (CEC) est déterminée par la méthode de Metson, selon les étapes suivantes :

- **Étape de saturation :** le sol est saturé par l'acétate d'ammonium (CH_3COONH_4,N, 77,08g/l, pH7).

- **Étape de lavage :** on procède avec l'éthanol pour enlever l'excès en cations saturants.
- **Étape de déplacement :** la percolation se fait par le chlorure de potassium (KCL, N, 74,55g/l) et la CEC est déterminée par titrimétrie au H_2SO_4.

Le rapport d'analyse du sol indique le pourcentage de la CEC occupé par chacun des cations basiques (Ca, Mg, K, Na). Ce pourcentage individuel exprime le niveau de saturation de la CEC en la base considérée.

Les taux de saturation (le pourcentage total de la CEC occupé par toutes les bases) en bases sont utiles pour identifier les extrêmes dans les rapports entre les cations. Un niveau très élevé d'un des cations basiques (Ca, Mg ou K) peut réduire la disponibilité de l'un des autres pour les plantes (DAT, 2001).

3.1.6.13. Humidité pondérale

Le premier problème que pose l'étude des relations entre le sol et l'eau consiste à exprimer les proportions de liquide présent dans un échantillon de terre. L'humidité du sol est déduite selon la méthode gravimétrique qui consiste à sécher l'échantillon à 105°C pendant 24 heures. Elle peut être définie par rapport au poids de la terre sèche selon la formule suivante :

$$H(\%) = \frac{PE}{PS} x100$$

Avec ;

H : Humidité du sol (%) ;
PE : poids de l'eau (g) ;
PS : le poids de terre sèche de l'échantillon (g) (Hénin, 1977).

3.1.7. Traitement statistique des données

Sans juger des carences, excès ou déséquilibres en éléments caractéristiques la fertilité des sols (cf. annexe 05), qui ne seront pas traités dans cette étude, on a essayé de relier les propriétés physico-chimiques et hydriques des sols, l'équilibre en cations ou leur déséquilibres dans le sol aux systèmes ligneux et agroforestiers, et ceci dans le cadre de l'effet des arbres et des systèmes agroforestiers sur la fertilité des sols.

3.1.7.1. Analyse en composantes principales (ACP)

Les données recueillies ont fait l'objet d'un traitement statistique (ACP) à l'aide de logiciel Stat Box version Pro.6.4 afin de déterminer les principales tendances et relations entre les différents paramètres. Le but final de ces représentations est l'interprétation par une analyse des résultats.

Les principales variantes de l'ACP viennent des différences de transformations du tableau de données. Le nuage de points peut être centré ou non, réduit ou non. Ainsi les données sont constituées d'individus et de variables qui dans le cas de l'ACP doivent être quantitatives, continues, elles peuvent être homogènes ou non et sont apriori corrélées entre elles. Les objectifs de l'ACP sont ceux d'une analyse factorielle, c'est-à-dire qu'elle cherche à représenter graphiquement les relations entre individus par l'évaluation de leurs ressemblances, ainsi que les relations entre variables par l'évaluation de leurs liaisons.

3.1.7.2. Analyse de variance

Les données ont été soumises à une analyse de variance à un facteur (ANOVA) en utilisant le test des moindres carrés de Fisher (LSD) au seuil de 5% et le test de Newman-Keuls, afin de comparer les moyennes des différents paramètres du sol à proximité de l'arbre et entre les arbres, avant et après la mise en place de la culture. Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel statistique Stat Box.

Toutes les données sont récapitulées dans les tableaux (cf. tab. 22, 23 et 24) d'une manière synthétique particulièrement adaptée au type d'analyse choisi dont l'objectif dépend d'une certaine présentation des données. On a jugé intéressant de passer par un traitement statistique car les buts recherchés sont de mettre en lumière certaines liaisons entre les variables explicatives et la fertilité des sols d'une part, et d'autre part, de découvrir les interrelations entre les différentes variables afin de mieux apprécier l'effet des arbres et l'impact des systèmes agroforestiers sur la fertilité des sols.

Caractérisées par 30 paramètres (variables), les propriétés des sols ont fait l'objet de 36 observations au total, sur 03 traitements avec 02 modalités chacun (cf. annexe 05). Pour notre cas on a opté pour l'analyse de variance (A.V), car elle permet de séparer dans la fluctuation totale, la part imputable à chacun des facteurs et à l'erreur expérimentale, dans l'explication de l'évolution de toutes les variables. Trois facteurs, chacun avec deux modalités, ont été pris en considération dans l'analyse : le traitement (S_1- S_2- S_3), la placette (P_1- P_2) avec 03 horizons respectifs (Hs-Hm-Hi). Les niveaux de signification qui sont atteints sont déterminés à partir des niveaux de probabilités :

- Très hautement significatif (THS) pour un niveau de probabilité 0,00001 ;
- Hautement significatif (HS) pour 0,0001 ;
- Très significatif (TS) pour 0,001 ;
- Significatif (S) pour 0,05 (seuil critique) ;
- Non significatif (NS) pour un niveau supérieur à 0,05.

3.2. Résultats et discussions

3.2.1. Interprétation des observations des profils culturaux

Le sol des sites expérimentaux se développe sur un matériau alluvial représentant une alternance de niveaux de sable fin et de sable grossier et correspondant aux différents cycles de dépôts alluviaux. L'observation des profils culturaux à proximité des arbres et entre les arbres (cf. tab. 05, 06 et 07), avant et après la mise en place de la culture dans chaque site expérimental, montre que :

- La profondeur du sol dans les deux premiers sites est forte (>50cm), et la profondeur du sol dans le troisième site est faible due à la présence d'une croûte calcaire dure à partir de 30 à 40 cm de profondeur.
- Il y a une distribution homogène de la matière organique entre les horizons des profils culturaux des deux premiers sites. Le labour conduit à une homogénéisation de la matière organique et, donc, à une réduction de sa teneur dans la couche du surface (Hs). A partir de cette description, on peut dire que le type de travail du sol a un effet important sur la distribution verticale de la matière organique entre les horizons des profils culturaux.
- Le système de jachère non travaillée durant une longue période entre les lignes d'arbres dans le troisième site minimise l'enfouissement des résidus, favorise quant à lui, l'accroissement de la teneur en matière organique dans les premiers horizons des profils (Hs, Hm). Cette accumulation de la matière organique dans la couche superficielle ou à la surface du sol a une incidence directe sur l'état biologique et physique de cette couche.
- L'activité biologique dans la couche superficielle du sol est généralement plus intense en système ligneux (avant la mise en place de la culture) qu'en système agroforestier (après la récolte). L'activité biologique de la couche superficielle du sol est donc favorisée par les types de travail du sol (labour, jachère non travaillée), et son humidité qui se concentrent dans cette couche.
- La variabilité de la compacité de chaque horizon semble être beaucoup influencée par la nature et le type de travail du sol. Il y a une formation de mottes compactes, peu poreuses et consistantes à l'état sec dans les profils situés entre les arbres dans les trois sites expérimentaux. Aussi, le tassement se produit le plus souvent en profondeur (Hm, Hi) et au niveau des profils creusés entre les arbres que ceux creusés à leur proximité, il se manifeste par une diminution de la porosité et une augmentation de la densité apparente du sol vers la profondeur (Hm, Hi) (cf. annexe 05). Dans le troisième site, il dépend des passages d'animaux (élevage ovins). Par contre, dans les deux premiers sites, il dépend du passage des engins mécaniques (passage du tracteur sur sol humide...). Ainsi, un sol non travaillé durant

une longue période a également tendance à se tasser au fil du temps, sous l'effet d'agents naturels (pluies, etc.).

- La comparaison du travail du sol dans les trois sites expérimentaux a montré que la stabilité de la structure du sol de surface est généralement plus grande dans les champs en jachère non travaillée (troisième site) que dans ceux travaillés de manière conventionnelle (labour). Donc, l'amélioration des propriétés du sol et, par conséquent, du profil, par la réduction du travail, se produit de façon graduelle sur plusieurs années. Dans le troisième site, il y a un faible risque de développer un horizon induré (tassé), ce qui favorise la pénétration en profondeur des racines.
- Un volume important des racines près de la surface du sol. Aussi, la pénétration en profondeur d'une partie du système racinaire est favorisée par le fait que la continuité des macropores ou des canaux creusés par les vers de terre n'est pas brisés par le passage d'outil de travail du sol durant la période humide.
- Les résidus des plantes adventices ne sont pas enfouis totalement mais laissés en surface du sol (enfouissement partiel des résidus).
- Présence d'une semelle de labour due au passage du soc et au poids des outils dans les deux premiers sites expérimentaux.

3.2.2. Interprétation des résultats d'analyse granulométrique des sols

La fraction du sable est généralement abondante dans les trois horizons des profils des sites expérimentaux. D'après l'analyse granulométrique, cette fraction varie entre 57 et 89% (cf. annexe 05).

Dans les deux premiers sites la teneur en argile est faible, elle ne dépasse pas les 15%. Le taux de limon fin varie entre 1 et 9%. On considère que cette teneur est faible (<10%) (Pousset, 2011). Ce sol présente une majorité de sable (≥73%). Un sol avec une telle composition a l'avantage de se ressuyer (éliminer l'excédent d'eau) rapidement. Le sol est d'une grande perméabilité, facile à travailler. Par contre, il a une faible réserve en eau et retient peu les éléments nutritifs.

Dans le troisième site, la teneur en argile varie entre 14 et 28 %. On considère que cette teneur est moyenne pour un taux d'argile variant de 15 à 25% et élevée, si elle dépasse 25% (Pousset, 2011). Le taux de limon fin varie entre 11 et 21%, cette teneur est plutôt faible (10 à 15%) à moyenne (15 à 25%) (cf. annexe 05).

D'après les valeurs respectives des fractions argiles, limons et sables (cf. annexe 05) projetées sur le triangle textural de l'USDA (cf.fig. 09) et suivant Hénin (1976) (cf. tab.08),

les sols étudiés appartiennent aux classes texturales sablo-limoneuse à limono-sableuse respectivement pour les deux premiers sites et limono-sableuse calcaire à limono-argilo-sableuse calcaire pour le troisième site expérimental.

3.2.3. Suivi de la croissance de la culture intercalaire (*Vicia faba*) et estimation du rendement

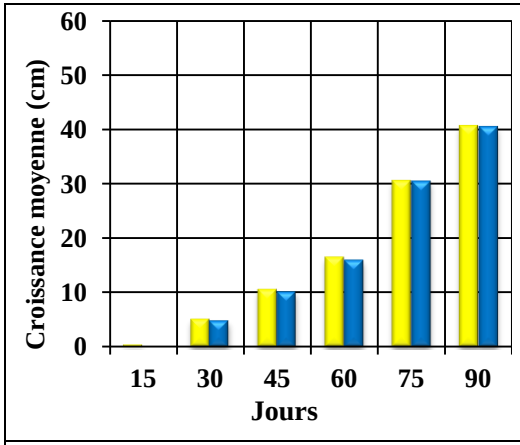
A 15 jours après le semis, le suivi de la croissance de la fève révèle des différences de croissance entre les traitements et ce, au cours du premier, deuxième et troisième mois de l'expérimentation avec toujours une meilleure évolution à proximité de l'arbre dans le deuxième et troisième site (cf. fig. 12, annexe 04).

Dans le premier site, la placette située à proximité de l'arbre offre une meilleure croissance de la fève au cours du premier et deuxième mois. Au cours du troisième mois, cette placette présente une évolution identique à celle entre les arbres, du fait de type de système racinaire peu puissant, les racines des agrumes se concentrent dans les premiers 50cm (ITAF, 1995) et l'eau et les éléments nutritifs sont des facteurs limitant dans le sol, expliquent en partie qu'il y a une concurrence entre l'espèce ligneuse et la culture intercalaire.

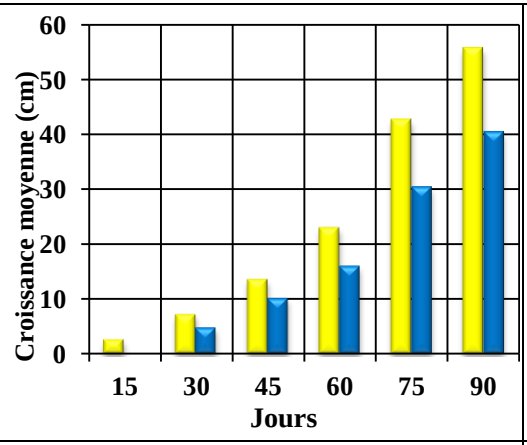
Dans le deuxième site, la richesse du sol à proximité de l'arbre, du fait de l'importante de la biomasse foliaire (placette sous le houppier de l'arbre) et les conditions d'humidité dans le système, expliquent en partie la bonne croissance de la fève à proximité de l'arbre par rapport aux autres sites (01 et 03). Du fait de la modification du microclimat sous le feuillage (diminution de la température), l'évaporation est moindre, l'effet améliorateur de l'arbre sur l'humidité du sol se traduit par une meilleure croissance en hauteur à proximité des arbres.

Le rendement de la fève (*Vicia faba*) associé au *Citrus sinensis, Olea europaea et Punica granatum,* présente les mêmes tendances évolutives (cf. fig. 12, annexe 04). En outre, les placettes situées à proximité de l'arbre dans le premier et le troisième site présentent un rendement statistiquement égal à celui des placettes entre les arbres. Dans ces sites, l'effet des ligneux sur la culture ne peut plus s'exercer au niveau des placettes situées à proximité des arbres.

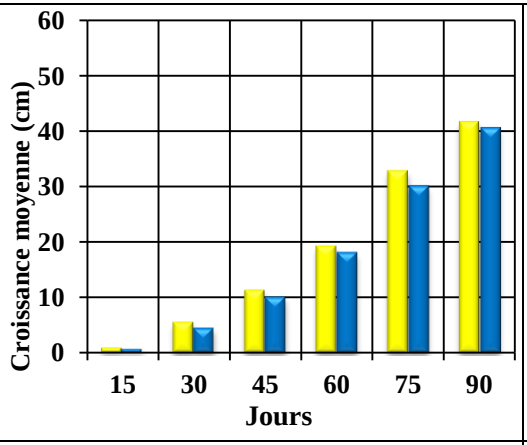
Le rendement de la fève dans le deuxième site est statistiquement plus élevé à proximité de l'arbre que dans la placette située entre les arbres. La taille importante du houppier (cf. annexe 02), la forte profondeur du système racinaire de l'espèce *Olea europaea* (une concentration des racines vers 80cm ou plus), et la hauteur des pieds de la fève à proximité de l'arbre (l'humidité généralement plus élevée sous le houppier de l'arbre) expliqueraient la bonne production de la fève dans ce site.



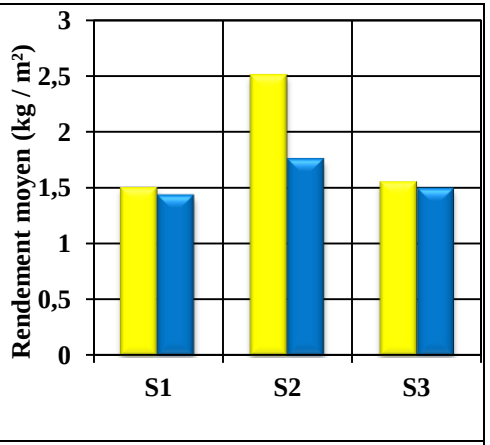
Site 01 : *Citrus sinensis/ Vicia faba*



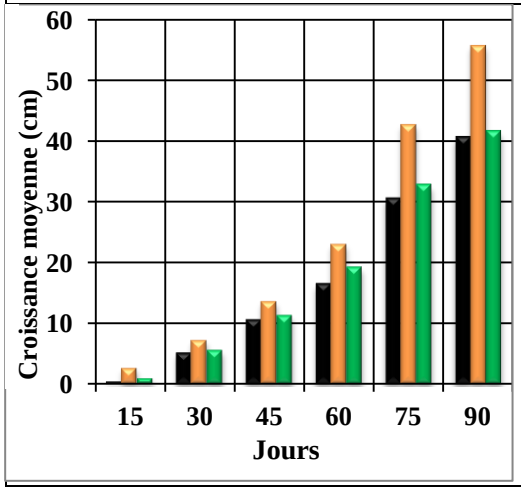
Site 02 : *Olea europaea/ Vicia faba*



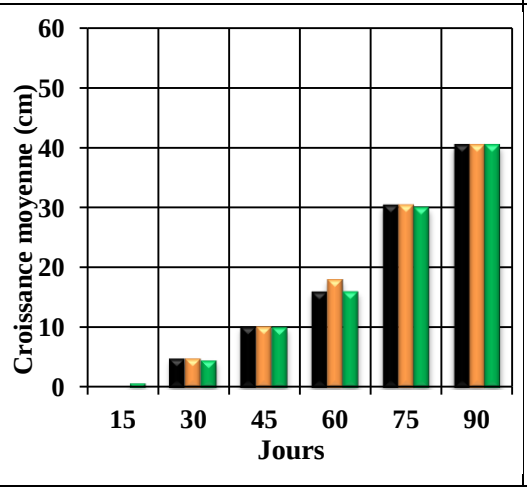
Site 03 : *Punica granatum/ Vicia faba*



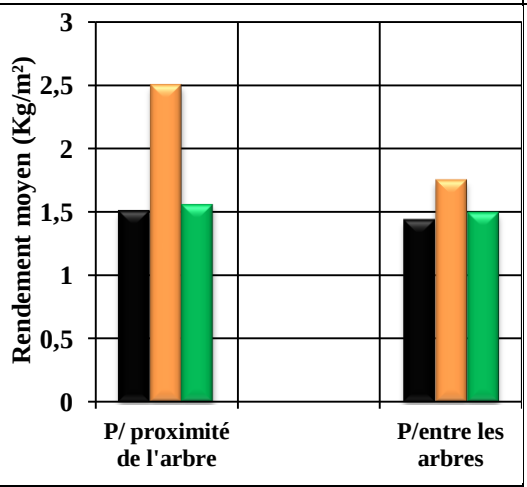
Rendement de la fève des trois sites



Placette à proximité de l'arbre



Placette entre les arbres



Rendement de la fève des trois sites

Légende:

- Placette à proximité de l'arbre
- Placette entre les arbres
- Site 01 ; *Citrus sinensis/Vicia faba*
- Site 02 ; *Olea europaea/Vicia faba*
- Site 03 ; *Punica granatum/Vicia faba*

Rdt :Rendement de la culture (Kg/m^2)

Fig. 12. Suivi de la croissance de la fève et estimation du rendement

3.2.4. Interprétation des résultats de l'ACP

Dans le but d'établir une relation entre les différents paramètres physico-chimiques et hydriques du sol et pour mieux évaluer l'effet des arbres et des systèmes agroforestiers sur la fertilité du sol dans la zone d'étude, un traitement statistique ACP (analyse en composantes principales) a été appliqué à l'ensemble des paramètres avant et après la mise en place de la culture. Pour le traitement des données par l'analyse en composantes principales, nous avons pris en considération 30 variables (cf. annexe 05) et comme individus les 36 prélèvements effectués entre novembre 2014 et avril 2015 (18 individus avant et après la mise en place de la culture) en fonction des 03 sites choisis au niveau de la zone d'étude.

3.2.4.1. L'effet des arbres

A. L'effet des arbres sur les propriétés physico-chimiques et hydriques des sols

- **Choix du nombre de dimension à étudier**

L'analyse des résultats permet de constater que la majeure partie des informations est expliquée par les deux premiers axes factoriels. Dans le plan factoriel F1xF2, les valeurs propres des deux composantes F1 et F2 et leur contribution à l'inertie totale sont représentées dans le tableau 10. Un pourcentage de 54,71% de la variabilité totale du nuage des individus (ou des variables) est représenté par le premier plan avec respectivement 33,39 % pour l'axe F1 et 21,32 % pour l'axe F2 (cf. tab.10).

Tab. 10. Pourcentage d'inertie expliquée par les deux premiers axes de l'ACP

	F1	**F2**
Valeur propre	8,35	5,33
Pourcentage de la variance	**33,39**	**21,32**
Pourcentage cumulatif de la variance	33,39	**54,71**

- **Etude du nuage des variables**

Les représentations du nuage des variables permettent de visualiser rapidement les corrélations entre variables. La fonction ACP fournit par défaut le premier graphique particulier à la méthode qui est le cercle des corrélations relatif aux axes F1 et F2 (cf. fig. 13). Ce dernier correspond à une projection des variables initiales sur un plan à deux dimensions constitué par les deux premiers facteurs (axes 1 et 2). Le résultat fondamental concernant les variables figure dans le tableau des corrélations variables-facteurs (cf. tab. 11) et le tableau des corrélations entre les variables (cf. tab. 12). Il s'agit des coefficients de corrélation linéaire entre les variables et les facteurs et les variables entre elles. Ce sont des corrélations qui vont permettre de donner un sens aux facteurs. Les deux axes pris en considération pour décrire les

corrélations entre les variables liées aux structures spatiales, détiennent à eux seuls 55% de l'information totale (cf. fig.13).

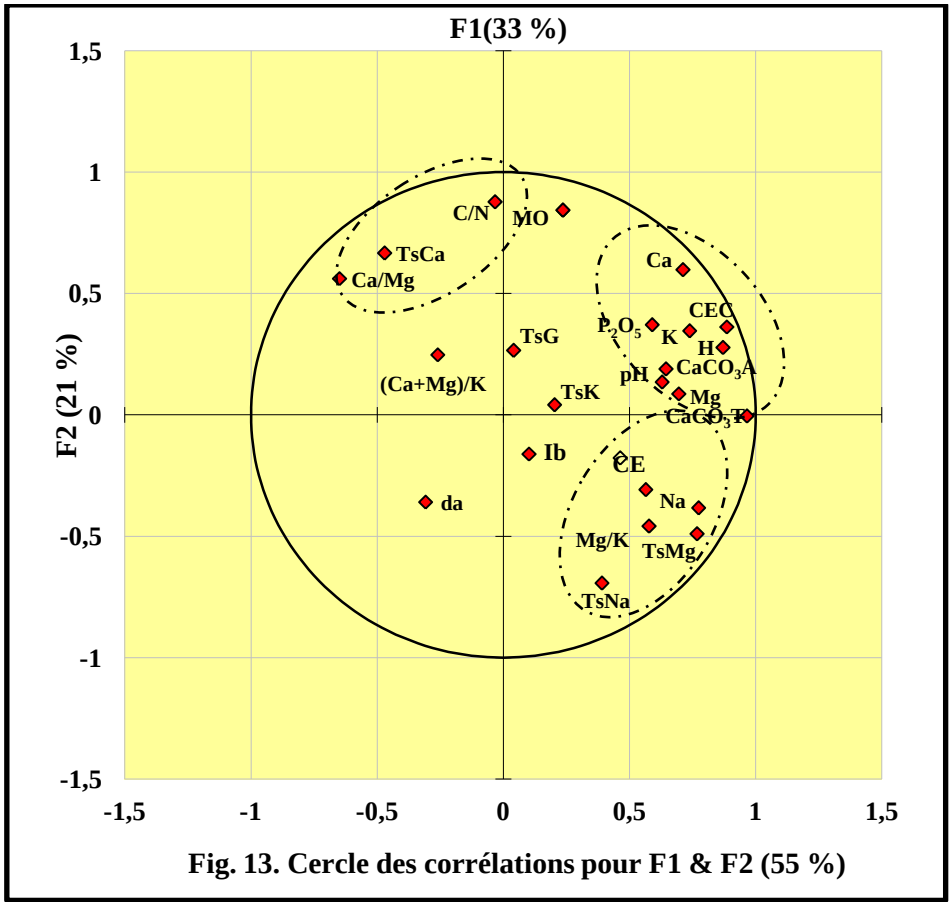


Fig. 13. Cercle des corrélations pour F1 & F2 (55 %)

A l'exception des variables, da, Ib, Ts.K, Ts.G et rapport (Ca+Mg)/K, toutes les autres variables sont assez bien représentées sur le plan 1-2. On lit cette qualité de représentation sur le graphe des variables, grâce à la proximité de l'extrémité du cercle de rayon 1. On retrouve les coordonnées des variables ainsi que leurs qualités de représentation (cosinus carré) et leurs contributions à la construction des axes dans le tableau 11.

L'examen du cercle de corrélation et de la matrice de corrélation entre variables (cf. fig. 13 et tab. 12) révèlent la présence d'une bonne corrélation entre les variables suivantes :

- L'H pondérale avec les variables du pH, la CEC, les bases échangeables (Ca, Mg, K, Na), Ts. Mg échangeable, le P_2O_5, le $CaCO_3$ total et actif. Ces variables sont très proches du cercle de corrélation et donc très bien représentées sur le graphe (cf. fig.13). Les bases échangeables sont bien corrélées positivement avec l'H du sol, ceci dit que l'humidité des sols a un effet sur l'échange du complexe argilo-humique. D'après Doucet (2010), l'humidité joue un rôle important dans la qualité d'échange cationique (type de cation échangeable).
- Le taux de saturation de Ca échangeable avec le rapport Ca/Mg et le rapport C/N.
- La CE avec le Mg échangeable, le Na échangeable, le taux de saturation de Mg, le rapport Mg/K et le $CaCO_3$ total et actif.

Tab.11. Résultats importants de l'ACP sur les variables : Corrélations des variables, cosinus carrés, contributions sur les deux axes 1 et 2						
Variables	**Corrélations**		**Cos²**		**Contributions**	
	F1	**F2**	**F1**	**F2**	**F1**	**F2**
da	-0,31	-0,36	0,10	0,13	1,14	2,42
Ib	0,10	-0,16	0,01	0,03	0,12	0,49
H	**0,87**	0,28	0,76	0,08	9,08	1,44
CE	**0,56**	-0,31	0,32	0,09	3,82	1,78
pH	**0,63**	0,13	0,40	0,02	4,74	0,34
CEC	**0,89**	0,36	0,79	0,13	9,41	2,46
Ca	**0,71**	**0,60**	0,51	0,36	6,07	6,71
Mg	**0,97**	0,00	0,93	0,00	11,17	0
K	**0,74**	0,35	0,55	0,12	6,53	2,25
Na	**0,77**	-0,38	0,60	0,15	7,17	2,76
Ts. G	0,04	0,27	0,00	0,07	0,02	1,32
Ts. Ca	-0,47	**0,67**	0,22	0,44	2,64	10,33
Ts. Mg	**0,77**	-0,49	0,59	0,24	7,06	4,51
Ts. K	0,20	0,04	0,04	0,00	0,49	0,63
Ts. Na	0,39	-0,69	0,15	0,48	1,83	9,02
Ca/Mg	-0,65	**0,56**	0,42	0,32	5,05	5,92
Mg/K	**0,58**	-0,46	0,33	0,21	5,55	3,95
(Ca+Mg)/K	-0,26	0,25	0,07	0,06	0,81	1,15
MO	0,24	**0,84**	0,06	0,71	1,34	20,68
C/N	-0,03	**0,88**	0,00	0,77	0,01	18,45
P_2O_5	**0,59**	0,37	0,35	0,14	5,17	2,58
$CaCO_3T$	**0,70**	0,09	0,48	0,01	5,8	0,14
$CaCO_3A$	**0,64**	0,19	0,42	0,04	4,98	0,67

Ainsi on voit que le 1er facteur est corrélé positivement avec chacune des variables suivantes : l'H, la CE, le pH, la CEC, les bases échangeables (Ca, Mg, K, Na), Ts. Mg échangeable, rapport Mg/K, le P_2O_5, $CaCO_3$ total et actif. En ce qui concerne l'axe 2, il oppose les variables suivantes : Ca échangeable, Ts.Ca échangeable, rapport Ca/Mg, MO et rapport C/N. La MO et le rapport C/N sont fortement corrélés avec l'axe 2, ce sont les variables les plus parlantes et les plus explicatives sur cet axe, avec des contributions respectivement 20,68 et 18,45%. La matière organique, comme c'est bien connu, joue un rôle important dans l'amélioration de l'activité biologique du sol et l'édification d'une bonne structure avec ses effets positifs sur l'aération, la perméabilité et la stabilité structurale du sol. Elle contribue aussi à l'alimentation des plantes par la fourniture et disponibilité d'éléments nutritifs à travers les processus de décomposition et de minéralisation (Huber et al., 2011). La MO et la CEC sont non-corrélées significativement ($r<0,5$). Généralement la CEC évolue dans le même sens que la matière organique, avec cependant une tendance à plus prononcée. Seul l'apport de fumier améliore significativement la CEC (Benoit-Cattin et al., 1994). Donc

la majeure quantité des bases échangeables dans les sols est déterminée principalement par les argiles ; par conséquent la CEC dépend surtout de la fraction minérale (Benhassine, 2006).

Les variables da, Ib, rapport (Ca+Mg)/K, Ts. G et de K échangeable, sont relativement proches du centre du graphique, toute interprétation de ces variables est hasardeuse, et l'examen de la matrice de corrélation entre les variables (cf. tab. 11) révèle présence aucune corrélation entre les variables suivantes : da, Ib, rapport (Ca+Mg)/K et Ts. G.

De ces observations, nous pouvons conclure que l'axe 1 représente donc en quelques sortes le résultat global des sols dans l'ensemble des variables étudiées, et peut être résumé par une faible corrélation entre la CEC et la MO et une bonne corrélation entre la MO et le Ca échangeable.

Tab.12. Corrélations entre les variables des deux axes (F1 & F2)

Variables		da	Ib	H	CE	pH	CEC	Cations échangeables				Taux de saturation					Equilibre cationique			MO	C/N	P_2O_5	$CaCO_3T$	CaCO3A
								Ca	Mg	K	Na	Global	Ca	Mg	K	Na	Ca/Mg	Mg/K	(Ca+Mg)/K					
da		**1**																						
Ib		-0,14	**1**																					
H		-0,22	0,18	**1**																				
CE		-0,09	0,10	0,29	**1**																			
pH		-0,19	0,05	**0,59**	0,12	**1**																		
CEC		-0,45	0,10	**0,86**	0,46	**0,58**	**1**																	
Cations échangeables	**Ca**	-0,36	0,09	**0,79**	0,31	0,48	**0,94**	**1**																
	Mg	-0,34	0,20	**0,84**	**0,58**	0,48	**0,86**	**0,69**	**1**															
	K	-0,48	0,23	**0,75**	0,11	0,46	**0,78**	**0,71**	**0,75**	**1**														
	Na	-0,09	0,13	**0,61**	**0,61**	0,39	**0,53**	0,31	**0,74**	0,29	**1**													
Taux de saturation	**Global**	0,29	0,25	0,19	-0,01	-0,25	0,05	0,25	0,13	0,13	0,07	**1**												
	Ca	0,15	0,12	-0,18	-0,29	-0,35	-0,15	0,19	-0,40	-0,18	**-0,58**	**0,61**	**1**											
	Mg	-0,02	0,14	**0,54**	**0,50**	0,25	0,44	0,21	**0,81**	0,47	**0,76**	0,14	**-0,63**	**1**										
	K	-0,25	0,24	0,24	-0,26	0,11	0,08	0,02	0,22	**0,66**	-0,08	0,08	-0,21	0,29	**1**									
	Na	0,22	-0,09	0,14	0,33	0,15	0,01	-0,22	0,33	-0,06	**0,79**	-0,01	**-0,69**	**0,68**	-0,06	**1**								
Equilibre cationique	**Ca/Mg**	0,06	-0,02	-0,37	-0,35	-0,37	-0,34	-0,08	**-0,60**	-0,41	**-0,61**	0,20	**0,80**	**-0,83**	-0,40	**-0,62**	**1**							
	Mg/K	0,18	-0,06	0,31	**0,77**	0,15	0,40	0,24	**0,59**	-0,03	**0,73**	0,09	-0,38	**0,68**	-0,46	**0,61**	-0,46	**1**						
	(Ca+Mg)/ K	0,29	0,00	-0,16	0,08	-0,08	-0,04	0,15	-0,23	-0,46	-0,16	0,25	**0,58**	-0,42	**-0,82**	-0,25	**0,67**	0,24	**1**					
MO		-0,39	-0,41	0,39	-0,20	0,32	0,42	**0,54**	0,19	0,37	-0,05	0,19	0,31	-0,19	0,06	-0,28	0,27	-0,25	0,04	**1**				
C/N		-0,31	-0,47	0,17	-0,24	0,02	0,25	0,45	-0,06	0,17	-0,23	0,23	**0,52**	-0,43	-0,06	-0,44	0,45	-0,33	0,14	**0,88**	**1**			
P_2O_5		-0,38	0,22	**0,66**	-0,03	0,34	**0,62**	**0,59**	**0,66**	**0,87**	0,14	0,20	-0,05	0,41	**0,52**	-0,14	-0,20	-0,05	-0,22	0,38	0,10	**1**		
$CaCO_3T$		-0,02	-0,10	**0,59**	**0,74**	0,46	**0,73**	**0,68**	**0,61**	0,26	**0,51**	0,00	-0,13	0,34	-0,31	0,13	-0,27	**0,67**	0,21	0,16	0,08	0,11	**1**	
$CaCO_3A$		0,04	-0,15	**0,62**	**0,59**	**0,50**	**0,72**	**0,72**	**0,53**	0,25	**0,**48	0,04	-0,05	0,23	-0,33	0,10	-0,20	**0,58**	0,24	0,24	0,20	0,05	**0,96**	**1**

B. L'effet des arbres sur le bilan ionique des sols

❖ **Choix du nombre de dimension à étudier**

L'analyse des résultats permet de constater que la majeure partie des informations est expliquée par les deux premiers axes factoriels. Un pourcentage 67,20% de la variabilité totale du nuage des individus est représenté par le premier plan avec respectivement 49,10 % pour l'axe F1 et 18,10 % pour l'axe F2 (cf. tab.13). Ce pourcentage est donc important et le plan représente bien la variabilité contenue dans l'ensemble du jeu de données actifs.

Tab. 13. Pourcentage d'inertie expliquée par les deux premiers axes de l'ACP

	F1	**F2**
Valeur propre	3,44	1,27
Pourcentage de la variance	**49,10**	**18,10**
Pourcentage cumulatif de la variance	49,10	**67,20**

❖ **Etude du nuage des variables**

Les deux premiers axes pris en considération pour décrire les corrélations entre les variables liées aux structures spatiales, détiennent à eux 67% de l'information totale. Le résultat fondamental concernant les variables figure dans le tableau des corrélations variables-facteurs (cf. tab. 14) et le tableau des corrélations entre les variables (cf. tab. 15).

L'axe F1 est exprimé vers son pôle positif par les HCO_3^-, le Na^+, le Ca^{2+}, les SO_4^{2-}, le Mg^{2+}, le Cl^-, et par le K^+ vers son pôle négatif (cf. fig.14).

A l'exception du variable K^+, toutes les autres variables sont assez bien représentées sur le plan 1-2. On lit cette qualité de représentation sur le graphe des variables, grâce à la proximité de l'extrémité du cercle de rayon 1. On retrouve les coordonnées des variables ainsi que leurs qualités de représentation (cosinus carré) et leurs contributions à la construction des axes dans le tableau 14.

L'examen du cercle de corrélation et de la matrice de corrélation entre variables (cf. fig. 14 et tab. 15) révèlent la présence d'une bonne corrélation entre les variables suivantes :

- Le Cl^- avec les variables Ca^{2+} et Mg^{2+}.
- Les SO_4^{2-}avec les variables Ca^{2+} et Mg^{2+}.
- Le Ca^{2+}avec les variables Mg^{2+}et Na^+.

Ces variables sont très proches du cercle de corrélation et donc très bien représentées sur le graphe (cf. fig.14).

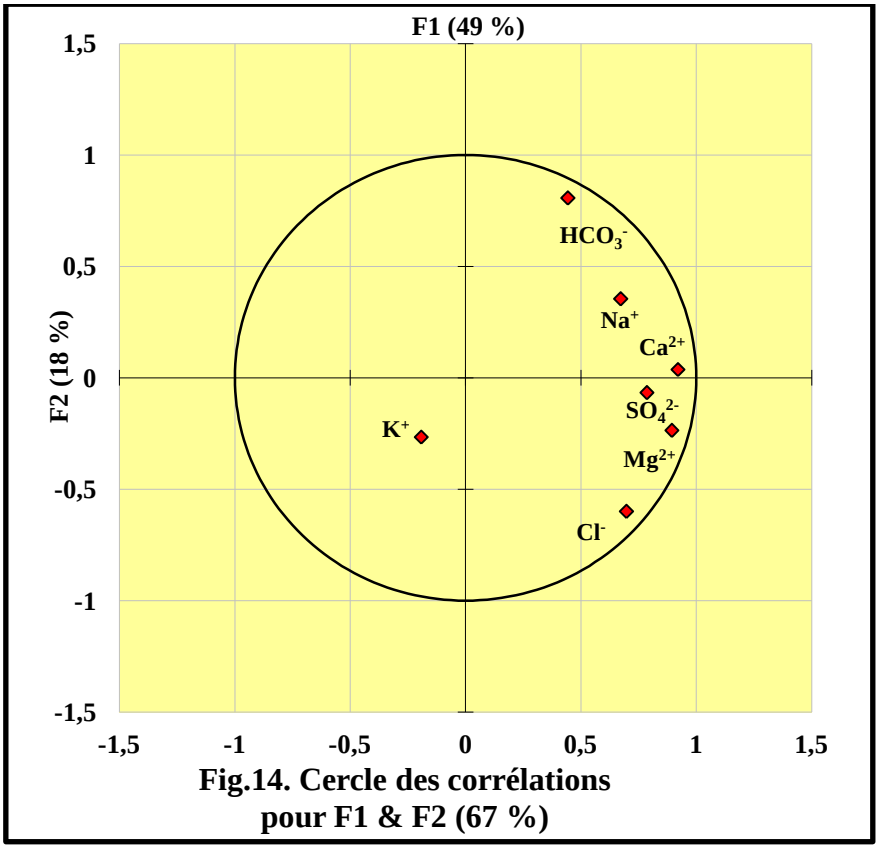


Fig.14. Cercle des corrélations pour F1 & F2 (67 %)

Tab.14. Résultats importants de l'ACP sur les variables : Corrélations des variables, cosinus carrés, contributions sur les deux axes 1 et 2

Variables	Corrélations		Cos^2		Contributions	
	F1	F2	F1	F2	F1	F2
Cl^-	**0,70**	-0,60	0,49	0,36	14,17	28,40
HCO_3^-	0,44	**0,81**	0,20	0,65	5,73	51,30
SO_4^{2-}	**0,79**	-0,07	0,62	0,00	17,96	0,35
Ca^{2+}	**0,92**	0,04	0,85	0,00	24,65	0,11
Mg^{2+}	**0,89**	-0,24	0,80	0,06	23,24	4,39
K^+	-0,19	-0,27	0,04	0,07	1,07	5,57
Na^+	**0,67**	0,35	0,45	0,13	13,18	9,88

Ainsi, on voit que le 1er facteur est corrélé positivement avec chacune des variables suivantes : le Cl^-, les SO_4^{2-}, le Ca^{2+}, le Mg^{2+} et le Na^+. En ce qui concerne l'axe 2, il oppose la variable HCO_3^-.

Tab. 15. Corrélations entre les variables des deux axes (F1 & F2)

Variables	Cl^-	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+
Cl^-	**1**						
HCO_3^-	-0,15	**1**					
SO_4^{2-}	0,47	0,38	**1**				
Ca^{2+}	**0,53**	0,42	**0,77**	**1**			
Mg^{2+}	**0,75**	0,21	**0,60**	**0,77**	**1**		
K^+	-0,15	-0,13	-0,11	-0,11	-0,15	**1**	
Na^+	0,31	0,42	0,29	**0,55**	**0,52**	-0,23	**1**

La variable K^+, est relativement proche du centre du graphique, et l'examen de la matrice de corrélation entre les variables (cf. tab. 15) révèle présence aucune corrélation de K^+avec les autres variables.

3.2.4.2. L'effet des systèmes agroforestiers

A. L'effet des systèmes agroforestiers sur les propriétés physico-chimiques et hydriques des sols

- **Choix du nombre de dimension à étudier**

L'analyse des résultats permet de constater que la majeure partie des informations est expliquée par les deux premiers axes factoriels. Un pourcentage de 54,08% de la variabilité totale du nuage des individus (ou des variables) est représenté par le premier plan avec respectivement 39,61% pour l'axe F1 et 14,47 % pour l'axe F2 (cf. tab.16).

Tab. 16. Pourcentage d'inertie expliquée par les deux premiers axes de l'ACP

	F1	F2
Valeur propre	9,51	3,47
Pourcentage de la variance	**39,61**	**14,47**
Pourcentage cumulatif de la variance	39,61	**54,08**

- **Etude du nuage des variables**

Les deux axes pris en considération pour décrire les corrélations entre les variables liées aux structures spatiales, détiennent à eux seuls 54% de l'information totale (cf. fig.15). Le résultat fondamental concernant les variables figure dans le tableau des corrélations variables-facteurs (cf. tab. 17) et le tableau des corrélations entre les variables (cf. tab. 18). Il s'agit des coefficients de corrélation linéaire entre les variables et les facteurs et les variables entre elles. Ce sont des corrélations qui vont permettre de donner un sens aux facteurs.

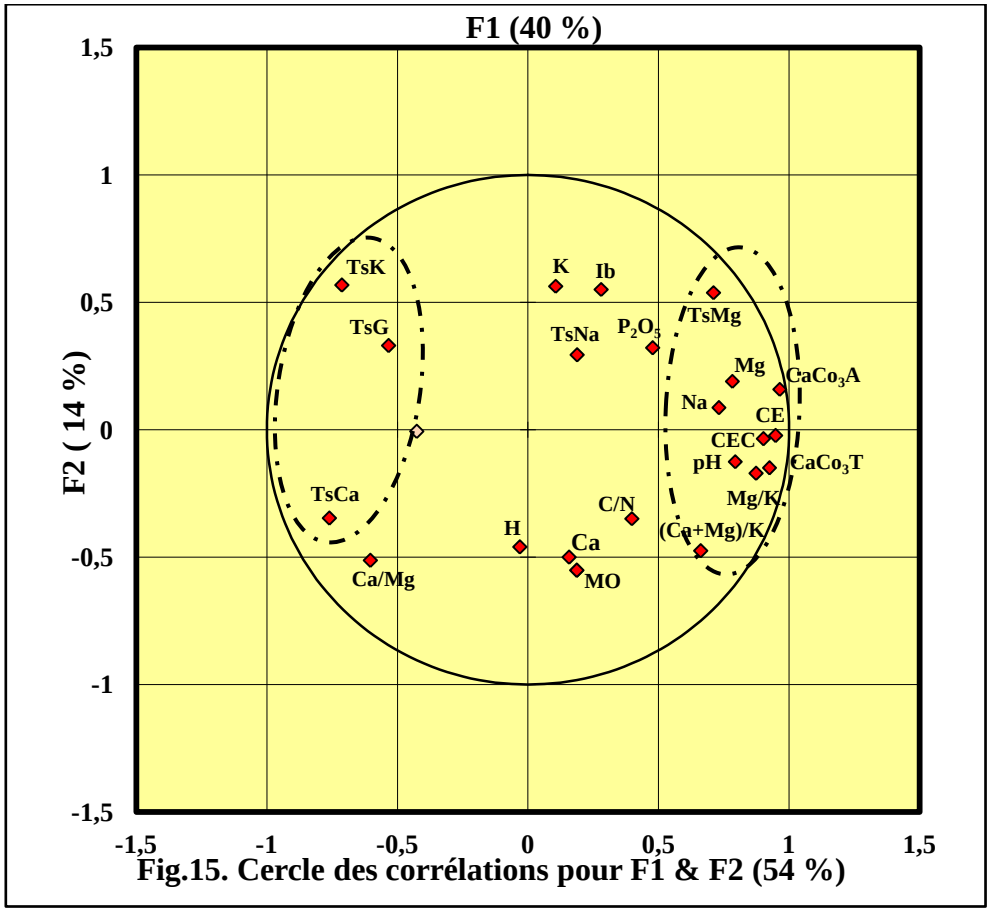


Fig.15. Cercle des corrélations pour F1 & F2 (54 %)

A l'exception des variables, H, Ts. Na, C/N, P_2O_5, toutes les autres variables sont assez bien représentées sur le plan 1-2. On lit cette qualité de représentation sur le graphe des variables, grâce à la proximité de l'extrémité du cercle de rayon 1. On retrouve les coordonnées des variables ainsi que leurs qualités de représentation (cosinus carré) et leurs contributions à la construction des axes dans le tableau 17.

L'examen du cercle de corrélation et de la matrice de corrélation entre variables (cf. fig. 15 et tab. 18) révèlent la présence d'une bonne corrélation entre les variables suivantes :

- La CE avec les variables du pH, la CEC, le Mg et Na échangeable, Ts. Mg échangeable, le rapport Mg/K et (Ca+Mg)/K, $CaCO_3$ total et actif. Ces variables sont très proches du cercle de corrélation et donc très bien représentées sur le graphe (cf. fig.15).
- Le rapport C/N et la MO.
- Le taux de saturation global avec de Ts. Ca et de K échangeable.

L'examen de la matrice de corrélation entre les variables (cf. tab.18) révèle la présence deux groupes de variables, constitués des variables corrélées négativement entre elles, quand les unes progressent, les autres diminuent. Il s'agit de la CE, le pH, la CEC, le Mg échangeable, le rapport Mg/K, le rapport (Ca+Mg)/K et le $CaCO_3$ total et actif avec les variables suivantes : le taux de saturation global, le Ts. K et de Ca échangeable, le rapport Ca/Mg.

Tab.17. Résultats importants de l'ACP sur les variables : Corrélations des variables, cosinus carrés, contributions sur les deux axes 1 et 2						
Variables	**Corrélations**		**Cos^2**		**Contributions**	
	F1	**F2**	**F1**	**F2**	**F1**	**F2**
Ib	0,28	**0,55**	0,08	0,30	0,83	9,73
H	-0,03	-0,46	0,00	0,21	0,01	6,09
CE	**0,95**	-0,02	0,90	0,00	9,47	0,02
pH	**0,90**	-0,04	0,81	0,00	8,56	0,04
CEC	**0,87**	-0,17	0,76	0,03	8,04	0,85
Ca	0,16	-0,50	0,02	0,25	0,26	7,22
Mg	**0,96**	0,16	0,93	0,03	9,78	0,72
K	0,11	**0,56**	0,01	0,32	0,12	10,00
Na	**0,73**	0,09	0,53	0,01	5,62	0,22
Ts. G	-0,53	0,33	0,28	0,11	3,00	3,14
Ts. Ca	-0,76	-0,35	0,58	0,12	6,09	3,47
Ts. Mg	**0,71**	**0,54**	0,51	0,29	6,32	8,35
Ts. K	-0,71	**0,57**	0,51	0,32	6,34	12,11
Ts. Na	0,19	0,29	0,04	0,09	0,37	2,48
Ca/Mg	-0,60	-0,51	0,36	0,26	3,84	7,57
Mg/K	**0,92**	-0,15	0,86	0,02	8,99	0,65
(Ca+Mg)/K	**0,66**	-0,47	0,44	0,23	4,61	6,50
MO	0,19	-0,55	0,03	0,30	0,74	10,06
C/N	0,40	-0,35	0,16	0,12	1,67	5,31
P_2O_5	0,48	0,32	0,23	0,10	2,40	3,98
$CaCO_3T$	**0,79**	-0,13	0,63	0,02	6,50	0,45
$CaCO_3A$	**0,78**	0,19	0,61	0,04	6,44	1,04

Ainsi on voit que le 1er facteur est corrélé positivement avec chacune des variables suivantes : la CE, le pH, la CEC, le Mg et le Na échangeable, Ts. Mg échangeable, le rapport Mg/K et (Ca+Mg)/K, le $CaCO_3$ total et actif. En ce qui concerne l'axe 2, il oppose les variables suivantes : l'Ib, K échangeable, Ts. Mg et de K échangeable. La MO et la CEC sont significativement non-corrélées (r proche de 0). Donc la majeure quantité des bases échangeables dans les sols est déterminée principalement par les argiles ; par conséquent la CEC dépend surtout de la fraction minérale (Benhassine, 2006).

Les variables H, Ts. Na, C/N, P_2O_5, sont relativement proches du centre du graphique, toute interprétation de ces variables est hasardeuse, et l'examen de la matrice de corrélation entre les variables (cf. tab. 18) révèle présence aucune corrélation entre ces variables.

De ces observations, nous pouvons conclure que l'axe 1 représente donc en quelques sortes le résultat global des sols dans l'ensemble des variables étudiées, et peut être résumé par une faible corrélation entre la CEC et la MO.

Tab.18. Corrélations entre les variables des deux axes (F1 & F2)

Variable		Ib	H	CE	pH	CEC	Cations échangeables				Taux de saturation					Equilibre cationique			MO	C/N	P_2O_5	$CaCO_3T$	$CaCO_3A$
							Ca	Mg	K	Na	Global	Ca	Mg	K	Na	Ca/Mg	Mg/K	(Ca+Mg)/K					
Ib		**1**																					
H		-0,37	**1**																				
CE		0,30	-0,07	**1**																			
pH		0,21	0,10	**0,91**	**1**																		
CEC		0,25	-0,01	**0,84**	**0,68**	**1**																	
Cations échangeables	**Ca**	0,04	0,18	0,17	-0,01	0,28	**1**																
	Mg	0,40	-0,12	**0,89**	**0,83**	**0,85**	0,11	**1**															
	K	0,42	-0,31	0,08	-0,17	0,20	-0,10	0,27	**1**														
	Na	0,39	-0,06	**0,71**	**0,74**	0,44	0,35	**0,68**	-0,13	**1**													
Taux de saturation	**Global**	0,13	-0,26	**-0,53**	-0,47	**-0,76**	0,07	-0,47	-0,04	0,06	**1**												
	Ca	-0,22	0,07	**-0,72**	**-0,71**	**-0,68**	0,40	**-0,77**	-0,32	-0,33	**0,66**	**1**											
	Mg	0,38	-0,22	**0,60**	**0,64**	0,39	-0,15	**0,80**	0,30	**0,66**	0,00	**-0,66**	**1**										
	K	0,04	-0,36	**-0,61**	**-0,64**	**-0,74**	-0,46	**-0,64**	0,29	-0,46	**0,58**	0,30	-0,25	**1**									
	Na	0,32	-0,12	0,13	0,31	-0,15	-0,04	0,15	-0,20	**0,67**	**0,52**	0,00	0,39	0,08	**1**								
Equilibre cationique	**Ca/Mg**	-0,25	0,07	**-0,50**	-0,46	-0,48	0,21	**-0,61**	-0,34	-0,38	0,35	**0,79**	**-0,66**	0,15	-0,17	**1**							
	Mg/K	0,20	-0,04	**0,90**	**0,87**	**0,83**	0,27	**0,85**	-0,17	**0,73**	**-0,52**	**-0,62**	**0,57**	**-0,75**	0,17	**-0,50**	**1**							
	(Ca+Mg)/ K	-0,01	0,17	**0,65**	**0,63**	**0,64**	**0,63**	**0,54**	-0,45	**0,67**	-0,33	-0,17	0,22	**-0,81**	0,17	-0,15	**0,84**	**1**						
MO		-0,12	0,02	0,19	0,17	0,21	0,07	0,13	-0,02	0,06	-0,22	0,00	-0,11	-0,33	-0,03	0,35	0,10	0,05	**1**				
C/N		-0,17	-0,18	0,28	0,18	0,43	0,14	0,31	0,11	0,14	-0,25	-0,19	0,10	-0,36	0,08	-0,18	0,31	0,21	**0,63**	**1**			
P_2O_5		0,46	-0,29	0,36	0,32	0,47	-0,26	**0,60**	**0,50**	0,19	-0,26	**-0,53**	**0,52**	-0,23	0,07	-0,27	0,29	-0,03	0,30	0,29	**1**		
$CaCO_3T$		-0,02	0,11	**0,83**	**0,77**	**0,68**	0,07	**0,69**	0,05	0,46	**-0,53**	**-0,61**	0,43	**-0,54**	0,01	-0,42	**0,70**	0,49	0,13	0,37	0,17	**1**	
$CaCO_3A$		0,26	0,02	**0,79**	**0,79**	0,49	0,10	**0,79**	0,19	**0,73**	-0,13	**-0,54**	**0,78**	-0,42	0,29	-0,43	**0,61**	0,38	0,08	0,12	0,26	**0,74**	**1**

B. L'effet des systèmes agroforestiers sur le bilan ionique des sols

❖ **Choix du nombre de dimension à étudier**

L'analyse des résultats permet de constater que la majeure partie des informations est expliquée par les deux premiers axes factoriels. Un pourcentage de 67,33% de la variabilité totale du nuage des individus est représenté par le premier plan avec respectivement 48,36 % pour l'axe F1 et 18,97 % pour l'axe F2 (cf. tab.19). Ce pourcentage est donc important et le plan représente bien la variabilité contenue dans l'ensemble du jeu de données actifs.

Tab. 19. Pourcentage d'inertie expliquée par les deux premiers axes de l'ACP

	F1	F2
Valeur propre	3,39	1,33
Pourcentage de la variance	**48,36**	**18,97**
Pourcentage cumulatif de la variance	48,36	**67,33**

❖ **Etude du nuage des variables**

Les deux premiers axes pris en considération pour décrire les corrélations entre les variables liées aux structures spatiales, détiennent à eux 67% de l'information totale (cf. fig.16). Le résultat fondamental concernant les variables figure dans le tableau des corrélations variables-facteurs (cf. tab. 19) et le tableau des corrélations entre les variables (cf. tab. 21).

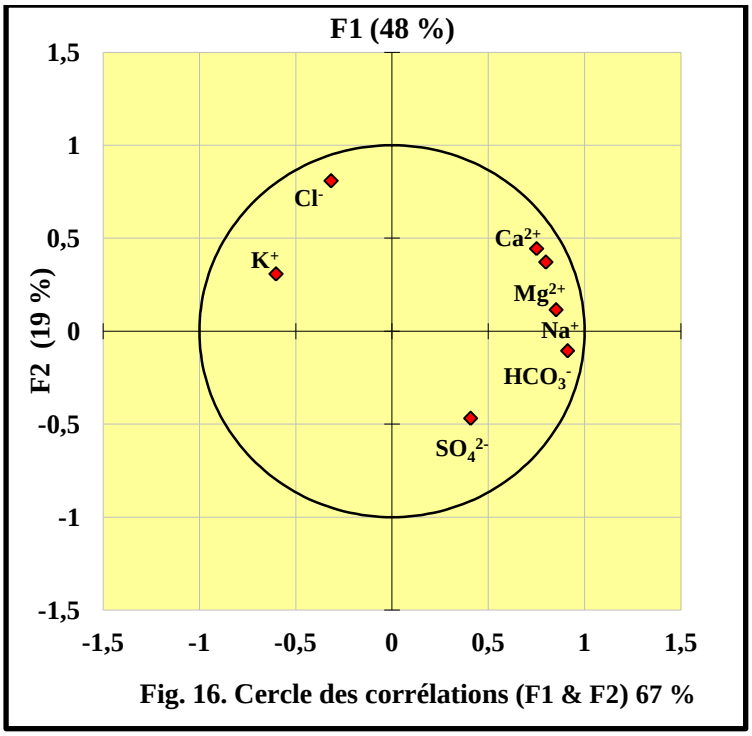


Fig. 16. Cercle des corrélations (F1 & F2) 67 %

L'axe F1 est exprimé vers son pôle positif par le Ca^{2+}, le Mg^{2+}, le Na^{+}, les HCO_3^{-}, le SO_4^{2-}, et par le Cl^{-} et le K^{+} vers son pôle négatif.

A l'exception du variable SO_4^{2-}, toutes les autres variables sont assez bien représentées sur le plan 1-2 (cf. fig. 16). On lit cette qualité de représentation sur le graphe des variables, grâce à la proximité de l'extrémité du cercle de rayon 1. On retrouve les coordonnées des variables ainsi que leurs qualités de représentation (cosinus carré) et leurs contributions à la construction des axes dans le tableau 20.

L'examen du cercle de corrélation et de la matrice de corrélation entre variables (cf. fig. 16 et tab. 21) révèlent la présence d'une bonne corrélation entre les variables suivantes : les HCO_3^-, Ca^{2+}, Mg^{2+} et Na^+. Ces variables sont très proches du cercle de corrélation et donc très bien représentées sur le graphe.

Tab. 20. Résultats importants de l'ACP sur les variables : Corrélations des variables, cosinus carrés, contributions sur les deux axes 1 et 2

Variables	Corrélations		Cos^2		Contributions	
	F1	F2	F1	F2	F1	F2
Cl^-	-0,32	**0,81**	0,10	0,65	2,95	49,26
HCO_3^-	**0,91**	-0,11	0,83	0,01	24,53	0,83
SO_4^{2-}	0,41	-0,47	0,17	0,22	4,90	16,53
Ca^{2+}	**0,75**	0,44	0,56	0,20	16,65	14,87
Mg^{2+}	**0,80**	0,37	0,64	0,14	18,85	10,37
K^+	-0,60	0,31	0,36	0,09	10,71	7,15
Na^+	**0,85**	0,11	0,72	0,01	21,41	0,99

Ainsi on voit que le 1er facteur est corrélé positivement avec chacune des variables suivantes : les HCO_3^-, le Ca^{2+}, le Mg^{2+} et le Na^+. En ce qui concerne l'axe 2, il oppose la variable Cl^-. La variable SO_4^{2-}, est relativement proche du centre du graphique. L'examen de la matrice de corrélation entre les variables (cf. tab. 21) révèle présence aucune corrélation de Cl^- et de SO_4^{2-} avec les autres variables.

Tab.21. Corrélations entre les variables des deux axes (F1 & F2)

Variables	Cl^-	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+
Cl^-	**1**						
HCO_3^-	-0,36	**1**					
SO_4^{2-}	-0,35	0,34	**1**				
Ca^{2+}	-0,02	**0,61**	0,10	**1**			
Mg^{2+}	0,02	**0,60**	0,38	**0,76**	**1**		
K^+	0,27	**-0,54**	-0,12	-0,22	-0,19	**1**	
Na^+	-0,13	**0,77**	0,12	**0,53**	**0,61**	**-0,58**	**1**

3.2.5. Interprétation des résultats de l'analyse de variance

Basée essentiellement sur le jugement du test de Fisher-Snédécor, qui reflète l'effet global du facteur sur les différentes variables caractérisant la fertilité du sol, et sur le test de Newman-Keuls qui permet de mettre en évidence la place (représentée par des lettres A, AB,

B, C, etc.) de chaque modalité du facteur en question par rapport à une autre dans l'explication de l'effet global. Les résultats obtenus sont récapitulés dans les tableaux 22, 23 et 24 montrant les effets de l'arbre et de l'association arbre-culture (système agroforestier) sur les paramètres physico-chimiques, hydriques et la fertilité du sol.

3.2.5.1. L'effet des arbres

- Les systèmes ligneux n'ont pas un effet global sur les paramètres physico-chimiques suivants : l'Ib, la da, la CE, le pH, la MO et le rapport C/N.
- La position de la placette et le changement de l'horizon du sol semble avoir une influence significative des arbres sur la densité apparente. Les variations de la densité apparente à différentes horizons des profils semblent être beaucoup influencées par les distances du tronc d'arbres. On observe que, plus on s'éloigne de l'arbre plus le sol est compact. Le tassement se produit entre les lignes d'arbres dû aux passages des agriculteurs, d'animaux et d'engins. La zone d'influence de l'arbre est d'environ 3 à 5 m de diamètre.
- Les systèmes ligneux ont un effet global très significatif sur le phosphore assimilable (P_2O_5) à différents horizons du sol. Le système caractérisant l'espèce ligneuse *Punica granatum* a un effet global plus important par rapport aux autres espèces ligneuses *(Citrus sinensis et Olea europaea*). Ainsi, la position de la placette ne semble avoir aucune influence des arbres sur le P_2O_5 du sol.
- Les systèmes ligneux ont un effet très significatif à hautement significatif sur le $CaCO_3$ total et actif dans le sol. La variabilité du calcaire semble être beaucoup influencée par le type de l'espèce ligneuse (*Citrus sinensis*, *Olea europaea*, *Punica granatum*) et le changement de l'horizon (Hs, Hm, Hi). Ainsi, la position de la placette ne semble avoir aucune influence significative des arbres sur le calcaire (total et actif) du sol.
- Les systèmes ligneux n'ont pas un effet global sur l'humidité du sol. Mais, la position de la placette par rapport aux arbres (à proximité des arbres ou entre les arbres) dans ces systèmes semble avoir une influence des arbres sur l'humidité du sol pour les trois horizons des profils (Hs, Hm, Hi).
- Les systèmes ligneux ont une influence globale significative à hautement significative sur la CEC, les cations échangeables (Ca, Mg, K et Na), les indices de la fertilité du sol (taux de saturation de Ca, Mg et Na) et l'équilibre Ca/Mg et Mg/K. Aussi, le système caractérisant l'espèce *Punica granatum* a un effet global plus important par rapport aux autres espèces ligneuses (*Citrus sinensis* et *Olea europaea*). La position de la placette dans ces systèmes semble avoir une influence significative à très significative des arbres sur la CEC, les cations échangeables (Mg, Na), le taux de saturation de Ca, Mg et Na et le rapport Mg/K, et cet effet

a une importance beaucoup plus à proximité des arbres. Ainsi, la variabilité des horizons a une influence significative sur la CEC, le K échangeable et l'équilibre Mg/K.

- Les systèmes ligneux ont une influence globale significative à très significative sur les bicarbonates (HCO_3^-), le calcium **(**Ca^{2+}) et le potassium (K^+). La position de la placette semble avoir une influence significative à très significative des arbres sur les cations (Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^+ et Na^+) solubles dans la solution du sol, et cette influence a une importance beaucoup plus à proximité des arbres due aux besoins des arbres en éléments nutritifs. Ainsi, la variabilité des horizons n'a pas d'une influence sur le bilan ionique des profils, excepté le K^+, comme on peut le remarquer dans le tableau 24. Gabriel et al.(1999), montrent que les phénomènes de prélèvements racinaires de potassium K^+, calcium Ca^{2+}, magnésium Mg^{2+} ou d'ammonium NH_4^+ qui sont accompagnés d'excrétion des composés organiques, contribuant à une plus importantes absorption de cation (Mg^{2+}, Ca^{2+} et K^+) que d'anions (NO_3^-, PO_4^-) par les racines.

3.2.5.2. L'effet des systèmes agroforestiers

- Les systèmes agroforestiers n'ont pas un effet global sur les paramètres physico-chimiques suivants : l'Ib, la MO et le rapport C/N. Mais, ces systèmes ont un effet global très significatif sur la CE et le pH du sol. Ainsi, le système caractérisant l'espèce ligneuse *Punica granatum* a un effet global plus important par rapport aux autres espèces ligneuses (*Citrus sinensis* et *Olea europaea*). Le maintien du pH du sol entre certaines limites proches de la neutralité, pH compris entre 6 et 7, est nécessaire pour que soient bien assimilés les éléments nutritifs du sol par les racines des plantes (cf.fig.11). Le pH est un paramètre que les racines des plantes peuvent directement modifier à travers de multiples processus parmi lesquels, principalement, la respiration racinaire, l'excrétion de substances racinaires des arbres et des cultures et la libération de H^+ et OH^- pour compenser un excédent net de cations ou d'anions (Hinsinger et al., 2009 cité par Mouas Bourbia, 2013).Pousset (2011), montre que l'activité biologique a toujours tendance à ramener le pH vers la neutralité, au voisinage de 7. Ainsi, le pH du sol varie en fonction de la saison, il est minimum en période sèche et maximum en période humide (hiver) (Fox et al., 2008). La CE ne révèle rien des éléments nutritifs qui sont présents ni de leur quantité, mais elle donne une idée globale de la valeur nutritive de la solution. Une CE faible indique une solution pauvre en ions dissous. Généralement, les cultures et les arbres ont une influence sur la CE dans les sols pauvres en éléments fertilisants (Doucet, 2010), cette influence peut être due au phénomène des prélèvements racinaires en macro-éléments (azote, phosphore, potassium, calcium, magnésium et soufre) nécessaires à la croissance des végétaux.

- Les systèmes agroforestiers ont un effet significatif sur l'indice de battance à différent horizons du sol. L'augmentation du taux de la matière organique dans le sol explique la diminution de l'indice de battance du sol.
- Les systèmes agroforestiers ont un effet global très significatif sur le P_2O_5 à différents horizons du sol. Aussi, le système caractérisant l'espèce ligneuse *Punica granatum* a un effet global plus important par rapport aux autres espèces ligneuses. Ainsi, la position de la placette ne semble avoir aucune influence des systèmes sur le P_2O_5 du sol.
- Les systèmes agroforestiers ont un effet global significatif à hautement significatif sur le calcaire total et actif du sol. La variabilité du calcaire semble être beaucoup influencée par le système caractérisant l'espèce *Punica granatum,* et par l'horizon supérieur et l'horizon inférieur (Hs, Hi). Ainsi, la position de la placette ne semble avoir aucune influence des systèmes sur le calcaire du sol.
- La variabilité de l'humidité semble être beaucoup influencée par le type le l'espèce ligneuse (*Punica granatum, Citrus sinensis* ou *Olea europaea*) et par la position de la placette par rapport aux arbres (à proximité des arbres ou entre les arbres) pour les trois horizons des profils (Hs, Hm, Hi). Elle est mieux ressentie dans le deuxième site que dans le premier et le troisième site, et beaucoup plus à proximité des arbres qu'entre les arbres.
- Les systèmes agroforestiers ont une influence globale significative à hautement significative sur la CEC, les cations échangeables (Mg, Na), le taux de saturation de Ca échangeable et l'équilibre Mg/K. Le système caractérisant l'espèce ligneuse *Punica granatum* a un effet global plus important par rapport aux autres espèces ligneuses. Ainsi, le test F s'avère non significatif pour la position de la placette dans ces systèmes et pour les trois horizons des profils culturaux.
- Les systèmes agroforestiers ont une influence globale significative à très significative sur le chlorure (Cl^-), les bicarbonates (HCO_3^-), le calcium **(**Ca^{2+}), le magnésium (Mg^{2+}) et le sodium (Na^+). La position de la placette semble avoir une influence très significative des systèmes sur le chlorure (Cl^-) soluble dans le sol, et cet effet est important à proximité des arbres qu'entre les arbres. Ainsi, la variabilité des horizons n'a pas d'une influence sur le bilan ionique des profils, excepté le calcium, comme on peut le remarquer dans le tableau 24.

3.2.5.3. Comparaison et discussion

- Les systèmes (ligneux et agroforestiers) ont un effet sur le phosphore assimilable (P_2O_5) du sol et beaucoup plus le système caractérisant l'espèce ligneuse *Punica granatum*. Généralement, les plantes s'alimentent à partir des ions libres et très mobiles de la solution. Ces ions constituent la réserve, ou le pool alimentaire. La solubilisation des phosphates est un

phénomène assez complexe et dépendant du pH du sol. En présence de calcium dans le sol, de fer, d'aluminium, etc., le phosphore se combine pour former des phosphates, composés insolubles. Le phosphore n'est plus disponible pour la plante, il n'est plus assimilable. Aussi, la présence de la matière organique dans le sol gêne l'évolution du phosphore vers ses formes complexes et ralentit ainsi la perte de mobilité du phosphore dans le sol (Largile et Lamotte, 2009). La diminution de calcium dans le sol (exporter par les arbres et la culture) et l'augmentation du taux de la matière organique du sol expliquent le phénomène de l'augmentation du phosphore assimilable du sol dans les deux premiers sites expérimentaux (cf. annexe 05). L'augmentation de taux du calcaire actif du sol, cette fraction de calcaire peuvent libérer facilement du calcium explique, la diminution du phosphore assimilable dans le troisième site. Gabriel (1999), montre que les phénomènes de l'activité racinaire sont particulièrement importants au niveau de la zone racinaire (rhizosphère) ; ils vont accélérer les processus de dissolution des carbonates sous forme $CaCO_3$, les racines des arbres et des cultures sont capables de dissoudre la calcite et d'altérer les roches calcaires les plus dures.

- La variabilité du calcaire est beaucoup plus influencée par le type du système et par le type de l'horizon du sol (Hs, Hm, Hi). La teneur en calcaire est variable d'un sol à un autre, car ce paramètre (calcaire) caractérisant chaque horizon se comporte différemment selon la nature du matériel parental et l'activité racinaire et biologique de chaque site expérimental qui lui est appliqué, comme on peut le constater sur le tableau 22.
- La variabilité de l'humidité semble être influencée par le type du sol et de l'espèce ligneuse, la position de la placette par rapport aux arbres et par le changement de l'horizon (Hs, Hm, Hi). Cela signifie qu'après une pluie, une taille importante de l'espèce *Olea europaea* caractérise un état hydrique relativement plus grand sous le houppier de cette espèce dans la période sèche, et ce houppier joue le rôle de parapluie durant la période humide. La faible teneur en eau au niveau de l'horizon de surface (Hs) semble être liée à la texture et à l'évaporation du sol. Généralement, la capacité du sol à retenir l'eau de pluie et à la redistribuer aux plantes dépend, elle aussi, de l'état structural. Les meilleures conditions de végétation sont obtenues lorsque la structure permet une bonne circulation de l'air pour alimenter la vie du sol et lorsque l'humidité est suffisante pour que les nutriments soient absorbés par les racines (Pousset, 2011). Dans cette étude, on peut dire que l'espèce ligneuse *Olea europaea* a un effet positif sur le facteur d'humidité du sol, et cet effet est beaucoup plus important par rapport aux autres espèces ligneuses.
- Les systèmes ont une influence globale sur la CEC, les cations échangeables, le taux de saturation des cations échangeables et l'équilibre Mg/K. Aussi, le système caractérisant

l'espèce *Punica granatum* a une influence plus importante par rapport aux autres espèces ligneuses due à l'importance de la taille du complexe argilo-humique dans ce site. L'analyse des résultats montre un accroissement significatif de la CEC est observé à proximité des arbres (cf. annexe 05). Mouas Bourbia (2013), montre un accroissement significatif de la CEC est observé immédiate des racines de l'olivier. Divers auteurs, dans des conditions de climat et de sol diverses, et pour différentes espèces de plantes sont obtenu des résultats similaires pour la CEC ; **[**Gobran (1998), Turpault et al. (2005-2007), Dinesh et al. (2010)**]**cité par Mouas Bourbia (2013). Les changements les plus importants des propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols sont causés par la libération du carbone et la densité racinaire élevée et par conséquent à une importante exsudation de composés organiques au niveau de la zone racinaire.

Les études les plus récentes, ont montré que la corrélation entre le potassium échangeable et fertilité du sol est faible ; cette corrélation devient élevée si l'on tient compte des rapports Mg/K ou (Ca+Mg)/K. Il semble que l'alimentation en potassium des plantes dépende de la densité des ions potassium par rapport aux autres cations. Cela signifie que plus le sol est pauvre en K disponible, plus sa teneur en Mg assimilable baisse (Doucet, 2010). Dans le cas d'une teneur relativement élevée en magnésium, une carence en potassium peut apparaître si le rapport Mg/K est inférieur à une certaine valeur. D'après les résultats d'analyses du sol avant et après la mise en place de la culture, le rapport Mg/K varie entre 1 et 2, et parfois inférieur à 1 (cf. annexe 05). Ce rapport est insuffisant pour que ces deux éléments soient en équilibre, donc il y a une carence en potassium dans le sol due aux phénomènes de prélèvements racinaires des arbres et des cultures en élément de potassium.

- Les systèmes ont une influence globale significative à très significative sur le bilan ionique des profils. Le système caractérisant l'espèce ligneuse *Punica granatum* a un effet global plus important sur le bilan ionique et beaucoup plus sur les bicarbonates par rapport aux autres espèces ligneuses. Car le calcium soluble sous forme de bicarbonate de calcium $Ca(HCO_3)_2$ est d'autant plus important que le taux de calcaire actif est élevé dans le sol (Largile et Lamotte, 2009). Smith (1976), montre une importante variation dans la composition des exsudats minéraux libérés par les arbres en fonction de l'espèce, ces résultats montrent qu'excepté le Na^+ c'est le K^+ et le Ca^{2+} qui sont libérés en plus forte quantité, et a dominé la fraction cationique tandis que la fraction anionique est principalement le Cl^- et les SO_4^{2-}. Ainsi, les racines et l'activité des microorganismes qui leur associés comme les bactéries produisent divers composés comme les acides organiques qui sont d'importants facteurs de la biodisponibilité des éléments nutritifs (Turpault et al., 2009).

Tab.22. Impact des systèmes sur les propriétés physico-chimiques et hydriques des sols (Récapitulatif des résultats de l'analyse de variance)																					
Facteurs	**Systèmes ligneux**				**Systèmes agroforestiers**				**Placettes**						**Horizons**							
Variables	**S_1**	**S_2**	**S_3**	**F**	**S_1**	**S_2**	**S_3**	**F**	**P_{1Av}**	**P_{2Av}**	**F**	**P_{1Ap}**	**P_{2Ap}**	**F**	**Hs_{Av}**	**Hm_{Av}**	**Hi_{Av}**	**F**	**Hs_{Ap}**	**Hm_{Ap}**	**Hi_{Ap}**	**F**
Ib	0,00	0,00	0,00	**0,05**	0,00	0,00	0,00	**3,83**	0,00	0,00	**0,06**	0,00	0,00	**0,13**	0,00	0,00	0,00	**3,38**	0,37	0,50	0,20	**11,08**
	/	/	/	**NS**	/	/	/	**NS**	/	/	**NS**	/	/	**NS**	/	/	/	**NS**	**AB**	**A**	**B**	**S**
da	0,00	0,00	0,00	**2,04**	/	/	/	**/**	1,56	1,68	**12,60**	/	/	**/**	1,52	1,62	1,72	**12,09**	/	/	/	**/**
	/	/	/	**NS**	/	/	/	**/**	**B**	**A**	**S**	/	/	**/**	**B**	**AB**	**A**	**S**	/	/	/	**/**
CE	0,00	0,00	0,00	**6,19**	0,04	0,04	0,10	**28,64**	0,00	0,00	**4,21**	0,00	0,00	**0,77**	0,00	0,00	0,00	**1,44**	0,00	0,00	0,00	**0,29**
	/	/	/	**NS**	**B**	**B**	**A**	**TS**	/	/	**NS**	/	/	**NS**	/	/	/	**NS**	/	/	/	**NS**
pH	0,00	0,00	0,00	**5,00**	7,14	7,24	7,68	**22,73**	0,00	0,00	**0,17**	0,00	0,00	**0,72**	0,00	0,00	0,00	**0,27**	0,00	0,00	0,00	**1,54**
	/	/	/	**NS**	**B**	**B**	**A**	**TS**	/	/	**NS**	/	/	**NS**	/	/	/	**NS**	/	/	/	**NS**
MO	0,00	0,00	0,00	**1,18**	0,00	0,00	0,00	**1,03**	0,00	0,00	**0,27**	0,00	0,00	**0,03**	0,00	0,00	0,00	**0,47**	0,00	0,00	0,00	**1,15**
	/	/	/	**NS**	/	/	/	**NS**	/	/	**NS**	/	/	**NS**	/	/	/	**NS**	/	/	/	**NS**
C/N	0,00	0,00	0,00	**0,24**	0,00	0,00	0,00	**0,84**	0,00	0,00	**0,43**	0,00	0,00	**1,03**	0,00	0,00	0,00	**0,84**	0,00	0,00	0,00	**0,29**
	/	/	/	**NS**	/	/	/	**NS**	/	/	**NS**	/	/	**NS**	/	/	/	**NS**	/	/	/	**NS**
P_2O_5	77,47	104,80	409,37	**99,01**	105,33	63,68	246,47	**93,20**	0,00	0,00	**0,44**	0,00	0,00	**0,86**	386,8	153,08	51,74	**86,14**	236,13	95,24	84,10	**72,91**
	B	**B**	**A**	**TS**	**C**	**B**	**A**	**TS**	/	/	**NS**	/	/	**NS**	**A**	**B**	**C**	**TS**	**A**	**B**	**B**	**TS**
$CaCO_3T$	0,71	0,71	11,04	**904,81**	0,64	0,64	8,99	**207,77**	0,00	0,00	**2, 70**	0,00	0,00	**4,31**	2,547	3,19	6,72	**5,29**	1,77	2,76	5,73	**38,03**
	B	**B**	**A**	**HS**	**B**	**B**	**A**	**HS**	/	/	**NS**	/	/	**NS**	**B**	**B**	**A**	**TS**	**B**	**B**	**A**	**TS**
$CaCO_3A$	0,13	0,21	2,60	**274,36**	0,25	0,23	3,13	**16,66**	0,00	0,00	**7,21**	0,00	0,00	**3,04**	0,503	0,86	1,59	**42,20**	0,00	0,00	0,00	**0,31**
	B	**B**	**A**	**HS**	**B**	**B**	**A**	**S**	/	/	**NS**	/	/	**NS**	**C**	**B**	**A**	**TS**	/	/	/	**NS**
H	0,00	0,00	0,00	**4,25**	1,13	5,24	3,68	**18,71**	3,22	5,11	**14,45**	1,12	0,61	**7,25**	2,20	2,73	1,67	**13,91**	1,02	1,93	2,57	**11,72**
	/	/	/	**NS**	**C**	**A**	**B**	**S**	**B**	**A**	**S**	**A**	**B**	**S**	**B**	**A**	**C**	**S**	**C**	**B**	**A**	**S**

Tab. 23. Impact des systèmes sur la CEC, les cations échangeables, les indices de la fertilité du sol et l'équilibre cationique (Récapitulatif des résultats de l'analyse de variance)

Facteurs		Systèmes ligneux				Systèmes agroforestiers				Placettes						Horizons							
Variables		S_1	S_2	S_3	F	S_1	S_2	S_3	F	P_{1Av}	P_{2Av}	F	P_{1Ap}	P_{2Ap}	F	Hs_{Av}	Hm_{Av}	Hi_{Av}	F	Hs_{Ap}	Hm_{Ap}	Hi_{Ap}	F
CEC		8,54	9,67	19,04	**541,78**	4,25	3,25	10,54	**12,08**	12,97	11,86	**15,09**	0,00	0,00	**0,01**	13,46	12,25	11,54	**15,31**	0,00	0,00	0,00	**0,16**
		C	**B**	**A**	**HS**	**B**	**B**	**A**	**S**	**A**	**B**	**S**	/	/	**NS**	**A**	**B**	**B**	**S**	/	/	/	**NS**
Cations échangeables	Ca	5,05	7,31	12,2	**257,95**	0,00	0,00	0,00	**0,70**	0,00	0,00	**4,70**	0,00	0,00	**3,47**	0,00	0,00	0,00	**5,47**	0,00	0,00	0,00	**0,34**
		C	**B**	**A**	**HS**	/	/	/	**NS**	/	/	**NS**	/	/	**NS**	/	/	/	**NS**	/	/	/	**NS**
	Mg	0,95	0,62	2,50	**263,89**	0,80	0,47	3,32	**1440**	1,63	1,08	**59,34**	0,00	0,00	**6,74**	0,00	0,00	0,00	**3,90**	0,00	0,00	0,00	**3,45**
		B	**C**	**A**	**HS**	**B**	**C**	**A**	**HS**	**A**	**B**	**TS**	/	/	**NS**	/	/	/	**NS**	/	/	/	**NS**
	K	0,59	0,52	1,24	**32,19**	0,00	0,00	0,00	**1,70**	0,00	0,00	**0,02**	0,00	0,00	**0,04**	1,092	0,72	0,54	**16,37**	0,00	0,00	0,00	**1,03**
		B	**B**	**A**	**TS**	/	/	/	**NS**	/	/	**NS**	/	/	**NS**	**A**	**B**	**B**	**S**	/	/	/	**NS**
	Na	0,75	0,23	1,33	**14,47**	0,22	0,13	0,57	**8,01**	1,06	0,48	**11,87**	0,00	0,00	**1,48**	0,00	0,00	0,00	**2,84**	0,00	0,00	0,00	**1,30**
		B	**B**	**A**	**S**	**B**	**B**	**A**	**S**	**A**	**B**	**S**	/	/	**NS**	/	/	/	**NS**	/	/	/	**NS**
Indices de la fertilité du sol (Taux de saturation)	Ts.G	0,00	0,00	0,00	**0,42**	0,00	0,00	0,00	**2,56**	0,00	0,00	**0,86**	0,00	0,00	**0,15**	0,00	0,00	0,00	**0,75**	0,00	0,00	0,00	**0,79**
		/	/	/	**NS**	/	/	/	**NS**	/	/	**NS**	/	/	**NS**	/	/	/	**NS**	/	/	/	**NS**
	Ts.Ca	59,60	76,17	64,2	**10,13**	43,93	46,02	16,96	**7,23**	61,53	71,78	**10,91**	0,00	0,00	**1,59**	0,00	0,00	0,00	**0,78**	0,00	0,00	0,00	**0,63**
		B	**A**	**B**	**S**	**A**	**A**	**A**	**S**	**B**	**A**	**S**	/	/	**NS**	/	/	/	**NS**	/	/	/	**NS**
	Ts.Mg	11,17	6,37	13,1	**14,36**	0,00	0,00	0,00	**5,65**	11,72	8,71	**8,13**	0,00	0,00	**0,01**	0,00	0,00	0,00	**0,46**	0,00	0,00	0,00	**0,07**
		A	**B**	**A**	**S**	/	/	/	**NS**	**A**	**B**	**S**	/	/	**NS**	/	/	/	**NS**	/	/	/	**NS**
	Ts.K	0,00	0,00	0,00	**1,76**	0,00	0,00	0,00	**3,95**	0,00	0,00	**0,87**	0,00	0,00	**1,42**	0,00	0,00	0,00	**6,03**	0,00	0,00	0,00	**0,29**
		/	/	/	**NS**	/	/	/	**NS**	/	/	**NS**	/	/	**NS**	/	/	/	**NS**	/	/	/	**NS**
	Ts.Na	9,15	2,24	7,13	**0,02**	0,00	0,00	0,00	**0,44**	8,33	4,02	**0,02**	0,00	0,00	**0,11**	0,00	0,00	0,00	**0,07**	0,00	0,00	0,00	**2,03**
		A	**B**	**A**	**S**	/	/	/	**NS**	**A**	**B**	**S**	/	/	**NS**	/	/	/	**NS**	/	/	/	**NS**
Equilibre entre les cations	Ca/Mg	5,54	13,43	5,44	**10,95**	0,00	0,00	0,00	**3,93**	0,00	0,00	**5,00**	0,00	0,00	**2,04**	0,00	0,00	0,00	**0,98**	0,00	0,00	0,00	**0,67**
		B	**A**	**B**	**S**	/	/	/	**NS**	/	/	**NS**	/	/	**NS**	/	/	/	**NS**	/	/	/	**NS**
	Mg/K	1,68	1,28	2,28	**19,33**	1,13	0,93	5,01	**8,71**	2,05	1,44	**21,32**	0,00	0,00	**0,06**	1,25	1,73	2,25	**18,73**	0,00	0,00	0,00	**0,45**
		B	**B**	**A**	**S**	**B**	**B**	**A**	**S**	**A**	**B**	**S**	/	/	**NS**	**C**	**B**	**A**	**S**	/	/	/	**NS**
	(Ca+Mg) /K	0,00	0,00	0,00	**1,52**	0,00	0,00	0,00	**1,63**	0,00	0,00	**0,40**	0,00	0,00	**0,80**	0,00	0,00	0,00	**1,37**	0,00	0,00	0,00	**0,49**
		/	/	/	**NS**	/	/	/	**NS**	/	/	**NS**	/	/	**NS**	/	/	/	**NS**	/	/	/	**NS**

Tab.24. Impact des systèmes sur le bilan ionique (Récapitulatif des résultats de l'analyse de variance)																				
Facteurs	**Systèmes ligneux**				**Systèmes agroforestiers**				**Placettes**						**Horizons**							
variables	**S_1**	**S_2**	**S_3**	**F**	**S_1**	**S_2**	**S_3**	**F**	**P_{1Av}**	**P_{2Av}**	**F**	**P_{1Ap}**	**P_{2Ap}**	**F**	**Hs_{Av}**	**Hm_{Av}**	**Hi_{Av}**	**F**	**Hs_{Ap}**	**Hm_{Ap}**	**Hi_{Ap}**	**F**
Cl^-	0,00	0,00	0,00	**0,18**	1,74	1,16	1,08	**19,62**	0,00	0,00	**1,74**	1,66	0,99	**51,69**	0,00	0,00	0,00	**0,79**	0,00	0,00	0,00	**0,68**
	/	/	/	**NS**	**A**	**B**	**B**	**S**	/	/	**NS**	**A**	**B**	**TS**	/	/	/	**NS**	/	/	/	**NS**
HCO_3^-	0,42	0,50	1,15	**31,65**	0,70	0,75	1,51	**83,61**	0,00	0,00	**1,16**	0,00	0,00	**0,24**	0,00	0,00	0,00	**0,35**	0,00	0,00	0,00	**1,25**
	B	**B**	**A**	**TS**	**B**	**B**	**A**	**TS**	/	/	**NS**	/	/	**NS**	/	/	/	**NS**	/	/	/	**NS**
SO_4^{2-}	0,00	0,00	0,00	**5,55**	0,00	0,00	0,00	**1,51**	0,00	0,00	**0,33**	0,00	0,00	**0,45**	0,00	0,00	0,00	**0,02**	0,00	0,00	0,00	**0,20**
	/	/	/	**NS**	/	/	/	**NS**	/	/	**NS**	/	/	**NS**	/	/	/	**NS**	/	/	/	**NS**
Ca^{2+}	0,75	1,61	2,47	**29,51**	1,09	1,17	1,66	**10,87**	2,05	1,16	**23,89**	0,00	0,00	**0,87**	0,00	0,00	0,00	**0,96**	1,61	1,18	1,13	**7,70**
	C	**B**	**A**	**TS**	**B**	**B**	**A**	**S**	**A**	**B**	**TS**	/	/	**NS**	/	/	/	**NS**	**A**	**B**	**B**	**S**
Mg^{2+}	0,00	0,00	0,00	**5,37**	0,79	0,54	1,18	**20,04**	2,17	0,78	**11,79**	0,00	0,00	**0,67**	0,00	0,00	0,00	**2,72**	0,00	0,00	0,00	**6,52**
	/	/	/	**NS**	**B**	**B**	**A**	**S**	**A**	**B**	**S**	/	/	**NS**	/	/	/	**NS**	/	/	/	**NS**
Na^+	0,00	0,00	0,00	**4,73**	1,34	0,90	2,40	**12,66**	2,27	1,64	**11,84**	0,00	0,00	**0,35**	0,00	0,00	0,00	**1,56**	0,00	0,00	0,00	**0,56**
	/	/	/	**NS**	**B**	**B**	**A**	**S**	**A**	**B**	**S**	/	/	**NS**	/	/	/	**NS**	/	/	/	**NS**
K^+	0,39	0,27	0,29	**19,71**	0,00	0,00	0,00	**5,16**	0,35	0,29	**11,85**	0,00	0,00	**1,26**	0,51	0,26	0,18	**152,17**	0,00	0,00	0,00	**0,58**
	A	**B**	**B**	**S**	/	/	/	**NS**	**A**	**B**	**S**	/	/	**NS**	**A**	**B**	**C**	**HS**	/	/	/	**NS**

3.2.6. Conclusion

Il ressort de ce travail que la présence des arbres dans les parcelles agricoles crée un environnement agroécologique favorable à la croissance des cultures.
Sous l'arbre, bien qu'une partie des précipitations soit interceptée par le houppier, le taux d'humidité du sol est resté plus élevé dans le temps, par rapport à celui du sol hors houppier. Cette humidité accrue du sol sous les houppiers a permis de réduire le stress hydrique de la culture intercalaire (la fève) à la maturation des grains, période au cours de laquelle les pluies étaient rares et insuffisantes. Mais l'effet ombrage a également une importance selon le type de l'espèce ligneuse.

Lorsqu'on analyse les composantes de rendement en relation avec les différentes placettes de suivi, on peut affirmer que l'ombrage des houppiers de l'espèce *Olea europaea* affecte plus la croissance et la productivité de la fève que celles des houppiers des espèces *Citrus sinensis* et *Punica granatum*. Dans les placettes entre les arbres, les rendements ont certes été réduits mais pas de façon significative par rapport à la placette à proximité des espèces *Citrus sinensis* et *Punica granatum*.

L'étude a cependant permis, à l'aide de l'analyse statistique de l'ACP et de variance, recours indispensable pour résoudre ce genre de problèmes, de mettre en évidence l'hétérogénéité des sols de la zone d'étude pour les caractéristiques physico-chimiques et hydriques intéressant directement l'utilisation agricole durable de ceux-ci, en particulier pour l'effet des arbres et des systèmes agroforestiers sur la fertilité des sols.

L'ANOVA nous a permis de faire ressortir également l'influence des arbres et des systèmes agroforestiers sur les propriétés physico-chimiques et hydriques des sols. A partir de ces résultats, on considère que l'effet des arbres sur la fertilité des sols n'est pas négligeable dans la zone d'étude.

Conclusion générale

L'objectif de l'étude est de déterminer les modifications provoquées par la présence de l'arbre (*Citrus sinensis, Olea europaea,* et *Punica granatum*) en association avec une culture (*Vicia faba*) sur les états physico-chimiques, hydriques et la fertilité du sol.

L'étude des interactions entre sol, arbre et culture doit permettre une bonne compréhension du fonctionnement du système agroforestier. Le dispositif expérimental de l'étude a été conçu afin de comparer les propriétés physico-chimiques et hydriques du sol à proximité et en dehors de l'arbre avant et après l'intégration de la culture afin d'expliquer l'effet des arbres et l'impact des systèmes agroforestiers sur la fertilité du sol. L'approche a été déclinée en trois modalités expérimentales relatant chacune des résultats.

Les sols étudiés appartiennent aux classes texturales sablo-limoneuse à limono-sableuse pour les deux premiers sites et limono-sableuse calcaire à limono-argilo-sableuse calcaire pour le troisième site expérimental.

La présence des arbres dans les parcelles agricoles crée un environnement agroécologique favorable à la croissance des cultures. Sous l'arbre, le taux d'humidité du sol est resté plus élevé dans le temps, par rapport à celui du sol hors houppier. Cette humidité accrue a permis de réduire le stress hydrique de la culture (*Vicia faba*), période au cours de laquelle les pluies étaient rares et insuffisantes. La variabilité de l'humidité semble être influencée par le type du sol et de l'espèce ligneuse.

L'analyse des composantes de rendement en relation avec les différentes placettes de suivi, affirme que l'ombrage du houppier de l'espèce *Olea europaea* affecte plus la croissance et la productivité de la culture intercalaire que celui des espèces *Citrus sinensis* et *Punica granatum.* En effet, ceci est dû à l'importante de leur biomasse foliaire et système racinaire puissant. Dans le premier et le troisième site, l'effet des espèces ligneuses *Citrus sinensis* et *Punica granatum* sur la culture ne peut plus s'exercer au niveau des placettes situées à proximité des arbres.

L'ACP a été réalisé sur 30 variables quantitatives avant et après la mise en place de la culture. L'analyse des valeurs propres permet de retenir les deux premiers axes factoriels. Ces derniers exprimant respectivement 54% de l'inertie totale pour les variables physico-chimiques et hydriques du sol, et 67% pour les variables de bilan ionique soit, 54% et 67% de l'information des tableaux de données sont contenue dans les deux premières dimensions.

A l'issue de cette étude, il ressort que :

- Les variations de la densité apparente semblent être beaucoup influencées par les distances vis-à-vis de l'arbre où le sol devient compact au fur et à mesure que l'on s'éloigne. La zone

d'influence de l'arbre est d'environ 3 à 5 m de diamètre. En augmentant la teneur en matière organique, les arbres accroissent la réserve du sol en éléments minéraux disponibles pour les plantes.

- Le pH est un paramètre que les racines des arbres et des cultures peuvent directement modifier. Cet effet sur le pH varie selon l'essence et le type du sol. Ainsi, la fertilité des sols est également liée au pH. En effet, selon le pH, les éléments minéraux sont présents sous des formes plus ou moins assimilables.
- Les systèmes agroforestiers ont une influence sur la CE dans les sols pauvres en éléments fertilisants, cette influence peut être due au phénomène des prélèvements racinaires en macro-éléments (P_2O_5, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+},…etc.). Ainsi, ces systèmes ont un effet sur l'indice de battance par l'augmentation du taux de la matière organique du sol.
- Le calcaire est beaucoup plus influencé par la nature du matériel parental de chaque site et de type de l'horizon du sol (Hs, Hm, Hi).
- Les arbres et les systèmes agroforestiers ont une influence sur la CEC, les cations échangeables, le taux de saturation des cations échangeables et l'équilibre cationique. L'étude a montré qu'un accroissement significatif de la CEC est observé à proximité des arbres. Mais, les phénomènes de prélèvements racinaires des arbres et des cultures peuvent créer un déséquilibre entre les éléments nutritifs.
- Les arbres ont une influence sur les cations solubles dans la solution du sol due aux phénomènes de prélèvements racinaires de K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+} qui sont accompagnés d'excrétion des composés organiques contribuant à une plus importante absorption de cations (Mg^{2+}, Ca^{2+} et K^+) que d'anions (NO_3^-, PO_4^-) par les racines.

A partir de ces résultats, on considère que l'effet des arbres et des systèmes agroforestiers sur les propriétés des sols n'est pas négligeable dans notre zone d'étude. L'effet de l'agroforesterie sur la fertilité des sols ne peut avoir des conséquences majeures qu'à moyen et long terme. Donc, le retour de l'arbre dans les milieux agricoles est une préoccupation indispensable afin d'assurer une gestion rurale durable de la fertilité des sols. L'introduction d'arbres dans les parcelles cultivées modifie progressivement et durablement le paysage agricole.

Références bibliographiques

1. Adgie G., Bernhard R. et al., 2011. De la taille à la conduite des arbres fruitiers. 3ème édition. Editions du Rouergue. France, 193-195p.

2. Anonyme, 2013. Wilaya de Mostaganem- Portail officiel de la wilaya de Mostaganem (www.wilaya-mostaganem.dz).

3. Anonyme, 2012. Le point sur fertilité des sols en production fruitière. Document établit un ensemble des définitions sur la place et l'importance des différents paramètres qui conditionnent la fertilité des sols.04-05p.

4. Anonyme, 2011. Améliorer l'efficacité agro-environnementale des systèmes agroforestiers. Agroof. Synthèse bibliographique ; CASDAR Agroforesterie 2009-2011, 04-07p.

5. Anonyme, 2009. Guide technique (PAGESA) : principes d'aménagement et de gestion des systèmes agroforestiers. Guide technique pour préserver la biodiversité, les ressources naturelles et la santé des agriculteurs comme des consommateurs. France, 01-13p.

6. Baets N. et Gariepy S., 2007.L'agroforesterie, Canada. 4-19p.

7. Bagnouls F., Gaussen H., 1953. Saison sèche et indice xérothermique. Bulletin Historique. Paris, 193-239.

8. Baize D., 2000. Guide des analyses en pédologie. 2ème édition. Edition INRA-Quae. 39-207p.

9. Baldy C., Dupraz C. et Scilizzi S., 1993. Vers de nouvelles agroforesteries en climats tempérés et méditerranéens. Cahiers Agricultures n°2. 375-386 p.

10. Bannasseur A., 2005. Référentiel pour la conduite technique de la fève (*Vicia faba*). Fiche technique. Maroc, 91-101p.

11. Benhassine H., 2006. Nature minéralogique et rôle nutritionnel des argiles de sols céréaliers en région subhumide à semi-aride (Tunisie). Direction des sols, ministère de l'agriculture et des ressources hydrauliques. Tunisie.

12. Benoit-Cattin M. et Carlos Juan, 1994. Promotion des systèmes agricoles durables dans les pays d'Afrique Soudano-sahélienne. Séminaire organisé par la FAO et le CIRAD, Sénégal, 56p.

13. Benzian I., 2009. Etude par Krigeage des données piézométriques de la nappe du plateau de Mostaganem, Thèse de magister en hydrogéologie, Université d'Oran- Faculté des sciences de la terre, de géologie et de l'aménagement du territoire, 52p.

14. Blanchard M., 2010. Gestion de la fertilité des sols et rôle du troupeau dans les systèmes coton-céréales-élevage au Mali-Sud : Savoir technique locaux et pratique d'intégration agriculture élevage. Thèse de doctorat. Document de recherche. France, 151p.

15. Boffa J.M., 2000. Le rôle de l'agroforesterie dans l'amélioration de la fertilité des sols. 04-07p.

16. Boulaine J., 1955. Notice explicative de la carte de reconnaissance des sols d'Algérie au 1/200 000 : Feuille de Mostaganem n°21,05-13p.

17. Boursali T., 2008. Hydrogéologie de la région de Bel-Hacel, mémoire de magister en hydrogéologie. Université d'Oran- Faculté des sciences de la terre, de géologie et de l'aménagement du territoire, 45-88p.

18. Boyer J., 1982. Les sols ferralitiques : Facteurs de fertilité et utilisation des sols. Paris. Tome X, 240p.

19. Brootcorne N., 2011. Analyse des facteurs d'adoption ou de rejets de l'agroforesterie dans le cadre d'un projet en région de Wallonne. Mémoire Université de Liège, 14p.

20. Burnie G., Forrester S., Greig D. et al., 2005. Botanica, Encyclopédie de botanique et d'horticulture. Paris, 232-922p.

21. Centre d'édition, de reproduction et de diffusion (CERDI) de documents pédagogiques, 1992. Fertilisation, cours n°51, 09-50p.

22. Centre d'étude et de prospective (CEP), 2012. Analyse de l'agroforesterie en France : intérêts et enjeux. Document des publications du service de la statistique et de la prospective, 01-04p.

23. Charif K., 2001. Contribution à une approche de développement agro-forestier de la commune de Tessala, Algérie ». Mémoire de magister en Ecologie appliquée. Faculté des sciences, institut des sciences de la nature, université de Sidi Bel Abbes Algérie.

24. Dinon E. et Gerstmans A., 2008. L'influence du pH sur l'assimilation des éléments nutritifs du sol par les plantes et sur la variété des plantes. Document pédagogique.

25. Direction de l'aménagement des terres (DAT), 2001. Guide de fertilisation des cultures. Document pour interpréter et utiliser le rapport d'analyse de sol et de l'Aquaculture. Canada, 08-13p.

26. Direction des ressources en eau (DRE), 2015. Situation du secteur des ressources en eau à travers la daïra de Mesra. Mostaganem, 01-02p.

27. Direction des services agricoles (DSA), 2015. Présentation de la subdivision agricole de Mesra. Mostaganem, 01-04p.

28. Direction des travaux publics (DTP), 2014. Nouvelle configuration du réseau routier de la daïra de Mesra. Mostaganem, 08p.

29. Doucet R., 2010. Le climat et les sols agricoles. Editions Berger. Canada, 26-333p.

30. Dupraz C. et Liagre F., 2011. Agroforesterie : des arbres et des cultures. 2ème édition. Edition France agricole. France, 01-282p.

31. Fox D., Carrega P., Morschel J., Emsellem K., 2008. La dégradation des sols dans le monde. Site online. France.

32. Frossard E., Julien P., Neyroud J. et Sinaj S., 2004. Le phosphore dans les sols : Etat de la situation en Suisse. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, 13p.

33. Gabriel, Callot en coordination avec la collaboration de Byé P., Raymond M., Femandez D., Pargney J., Paraguey L., Janex-Fauve M., Moussa R. et Pagès L., 1999. La truffe, la terre, la vie. Edition INRA. Paris, 167-168p.

34. Garrett H.E. et Graw MC, 2000. Alleycropping practices. In North American agroforestry: anintegrated science and practice. Édité par H.E. Garrett, W.J. Rietveld et R.J. Fisher. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA, 149-188 p.

35. Genot V., Colinet G., Bock L. et al, 2009. La fertilité et la biodiversité dans le sol. Document sur la gestion durable des sols agricoles et forestiers. Belgique, 122-124p.

36. Gobat J., Aragno M. et Matthey W., 2010. Le sol vivant : Bases de pédologie-Biologie des sols. 3ème édition. Editions Quae. Italie, 54-79p.

37. Hénin S., 1977. Cours de physique du sol II : L'eau et le sol- Les propriétés mécaniques- La chaleur et le sol. Edition ORSTOM et EDITEST. Paris, 14p.

38. Hénin S., 1976. Cours de physique du sol. volume I : Texture- Structure- Aération. Edition ORSTOM et EDITEST. Paris, 24p.

39. Huber G. et Schaub C., 2011. La fertilité des sols : L'importance de la matière organique. Document sur l'intérêt de nourrir le sol pour nourrir la plante, 02-23p.

40. Institut national de la recherche agronomique (INRA), 2013. Notions sur les propriétés du sol et la nutrition des plantes. Laboratoire de fertilité des sols. Document sur la conduite de la fertilisation et à la fertilité du sol dans le système d'agriculture de conservation. Algérie.

41. Institut technique de l'agriculture biologique (ITAB), 2005. Produire des agrumes en agriculture biologique. Fiche technique d'arboriculture. France.

42. Institut technique de l'arboriculture fruitière (ITAF), 1995. Agrumiculture 03 : Taille des agrumes. Ministère de l'agriculture- Algérie, 07-09p.

43. Jacquemond C., Curk F., Heuzet M., 2013. Les clémentines et autres petits agrumes. Editions Quae. France, 17-212p.

44. Largile et Lamotte, 2009. Guide du sol. ENESAD-Unité Informatique-Pédagogique-Lucie Pasquier. Document pédagogique, 36-44p.

45. Liagre F., 2011. L'Agroforesterie : Quels enjeux pour l'agroforesterie en Haute-Bruche?. Journée d'agroforesterie, 02p.

46. Liagre F., 2009. Fiche technique ; Connaître et maitriser un système de production en agroforesterie. France. 01-05p.

47. Mars M., 1993. La culture de grenadier (*Punica granatum*) et du figuier (*Ficus carica* L.) en Tunisie. CIHEAM- options Méditerranéennes ; Institut des régions arides, 85p.

48. Meyer S., Reeb C. et Bosdeveix R., 2008. Botanique : Biologie et physiologie végétales. 2ème édition. Edition MALOINE. Paris, 147.

49. Mouas Bourbia S., 2013. Biodisponibilité du potassium dans la rhizosphère d'*Olea europaea* L. Thèse doctorat- Université Mouloud Mammeri-Tizi Ouzou. Algérie, 35-110p.

50. Mrabet R. et Moussadek R., 2012. Guides sur les principes de gestion des sols pour l'adaptation au changement climatique au Maroc. Document de la synthèse des techniques de gestion des sols, 13-23p.

51. Musy A. et Soutter M., 1991. Physique du sol. Editions Collection gérer l'environnement, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (PPUR), 06p.

52. Organisation météorologique mondiale (OMM), 2005. Le climat et la dégradation des sols. Informations climatologiques – conservation des ressources – gestion viable des terres. 10-20p.

53. Pousset J., 2011. Engrais verts et fertilité des sols. 3ème édition. Editions France Agricole. Paris, 30-190p.

54. Richard G., 2008. Dégradation physique des sols agricoles et forestiers liée au tassement : impact, prévision, prévention, suivi et cartographie. Programme GESSOL-Rapport de fin de contrat, 04p.

55. Santich B. et Bryant G., 2013. 500 plantes comestibles ; Histoire-Botanique-Alimentation. Editions Delachaux et Niestlé. Paris, 121-210p.

56. Schöl L., 2005. Agrodok 2 : Gérer la fertilité du sol. Document pour améliorer la fertilité du sol. Pays-Bas, 10-66p.

57. Smith W., 1976. Character and significance of forest tree root exudates. Ecology 57: 324-331- ESA Online journals.

58. Torquebiau E., 1990. Introduction aux concepts d'agroforesterie. Document de travail n°59. ICRAF, Nairobi Kenya. 121 p.

59. Trehen P., Lefleuvre J. et al, 2003. Gestion des sols et apports de déchets organiques en Bretagne. Conseil scientifique de l'environnement. Rapport d'un conseil scientifique, 02p.

60. Turpault M., Nys C. et Calvaruso C., 2009. Rhizosphere impact on the dissolution of test minerals in a forest ecosystem. Online journals. France.

61. Vedie H., 2008. Fertilité chimique du sol : Savoir interpréter les analyses pour gérer les apports d'éléments majeurs (Phosphore, Potasse, Magnésie) en maraichage biologique. Rencontres techniques, 01p.

62. Verheij E., 2005. Agrodok 19 ; Multiplier et planter des arbres. 2ème édition. Edition Digigrafi, 09-15p.

63. Walali, Loudyi, Skiredji A. et Hassan E., 2003. Fiches techniques : le bananier, la vigne et les agrumes. Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II.

64. Williams P.A., Gordon A.M., Garrett H.E. et Buck L., 1997. Agroforestry in North America and its role in farming systems. In Temperate Agroforestry Systems. Édité par A.M. Gordon et P.A. Williams. CAB International, Oxon, UK, 8-9 p.

65. Yélémou B**.**, Yaméogo G., Barro A., Taonda S.J., Hien V., 2013. La production de sorgho dans un parc à *Piliostigma reticulatum* en zone nord-soudanienne du Borkina Faso. 154-160p.

66. Young A., 1995. L'agroforesterie pour la conservation des sols. Centre technique de coopération agricole et rural, ACP-UE et centre international pour la recherche en agroforesterie, 142p.

Annexe

Annexe 01 - Paramètres climatiques de la zone d'étude de 1990 à 2012

Tab.01.Régime mensuel des précipitations de la station de Mostaganem													
Mois	**J**	**F**	**M**	**A**	**M**	**J**	**Jt**	**At**	**S**	**O**	**N**	**D**	**année**
Pluies (mm)	57,21	47,83	36,91	26,20	14,58	6,20	1,73	3,21	22,48	38,84	69,61	53,33	378,13

Tab. 02. Températures moyennes mensuelles des minimums et maximums													
Mois / Temp.	**J**	**F**	**M**	**A**	**M**	**J**	**Jt**	**At**	**S**	**O**	**N**	**D**	**Moyenne**
Température Moyenne des max.(M) en °C	16,16	17,04	19,14	20,85	23,78	28,09	31,34	32,12	28,47	24,85	19,66	17,05	23,21
Température Moyenne des min. (m)en °C	5,61	6,34	7,80	9,56	13,24	16,73	19,43	20,32	17,68	14,37	9,62	7,48	12,34
Température Moyenne en °C. (M+m)/2	10,89	11,69	13,47	15,21	18,51	22,41	25,39	26,22	23,08	19,61	14,64	12,27	17,78

Tab. 03. Humidité moyenne mensuelle de l'air												
Mois	**J**	**F**	**M**	**A**	**M**	**J**	**Jt**	**At**	**S**	**O**	**N**	**D**
Hr(%)	86,75	82,20	81,10	76,90	71,55	70,40	68,50	69,35	74,20	77,50	78,60	78,95

Tab.04. Vitesse moyenne mensuelle du vent												
Mois	**J**	**F**	**M**	**A**	**M**	**J**	**Jt**	**At**	**S**	**O**	**N**	**D**
V (m/s)	1,58	1,87	1,96	3,20	2,80	2,35	1,82	2,03	2,14	2,14	2,07	2,17

Tab. 05. Insolation moyenne mensuelle, période 1990 à 2012												
Mois	**J**	**F**	**M**	**A**	**M**	**J**	**Jt**	**At**	**S**	**O**	**N**	**D**
I(h)	190,84	205,22	248,05	259,90	293,96	316,95	322,15	303,64	267,94	229,34	181,89	175

Tab.06. Évapotranspiration moyenne mensuelle													
Mois	**J**	**F**	**M**	**A**	**M**	**J**	**Jt**	**At**	**S**	**O**	**N**	**D**	**Total**
Évapotranspiration (mm)	55,4	60,4	82,18	97,5	115,6	128,96	160,78	159,6	101,2	88,5	61,6	59,6	1171,32

Annexe 03- Suivi de la croissance de la culture intercalaire (*Vicia faba*) et estimation du rendement

Tab.07. Identification des sites expérimentaux

Site	Caractéristiques des ligneux		Densité (arbre/ha)	Précédent cultural (culture intercalaire)	Itinéraires techniques			
					Labour	Fertilisation organique	Fertilisation minérale	Irrigation
01	**Espèce**	*Citrus sinensis*	400	Jachère non travaillée	superficiel	fumure organique (2013)	N, P, K (2013)	gravitaire
	Age (ans)	12						
	Hauteur (cm)	250						
	Forme de houppier	Sphérique						
	Diamètre de houppier (cm)	240						
02	**Espèce**	*Olea europaea*	250	Fève(2012)/ Jachère non travaillée	superficiel	fumure organique (2012)	///	pluviale
	Age (ans)	80						
	Hauteur (cm)	400						
	Forme de houppier	Sphérique						
	Diamètre de houppier (cm)	420						
03	**Espèce**	*Punica granatum*	250	Jachère non travaillée	///	fumure organique (2013)	///	À la raie
	Age (ans)	20						
	Hauteur (cm)	300						
	Forme de houppier	Sphérique						
	Diamètre de houppier (cm)	260						

Tab.08. Suivi de la croissance de la culture intercalaire (*Vicia faba*) et estimation du rendement												
	Croissance moyenne (cm)						Rendement moyen (Kg/m^2)					
Placette	**à proximité de l'arbre**			**Entre les arbres**			**à proximité de l'arbre**			**Entre les arbres**		
Site / **Jours**	01	02	03	01	02	03	01	02	03	01	02	03
15	0,42	2,66	0,95	0,00	0,00	0,75	1,50	2,05	1,50	1,42	1,55	1,46
30	5,20	7,21	5,59	4,90	4,87	4,55						
45	10,60	13,61	11,32	10,20	10,18	10,09						
60	16,50	23,03	19,23	16,00	18,03	16,05						
75	30,50	42,68	32,70	30,40	30,37	30,00						
90	40,50	55,68	41,50	40,40	40,37	40,42						

Annexe 04-Résultats d'analyses physico-chimiques et hydriques des sols

Site (S)	Profil (P)	Horizon(H)	Granulométrie (%)								Ib		da (g/cm^3)
			Argile	Limon fin	Limon grossier	Limon (fin+ grossier)	Sable fin	Sable grossier	Sable (fin+ grossier)	Texture du sol	Avant	Après	
S_1	P_1	H_s	9,67	7,10	3,94	11,04	41,36	37,92	79,28	Limono-sableuse	0,77	0,51	1,41
		H_m	6,48	5,81	2,31	8,12	40,66	44,73	85,39	Sablo-limoneuse	0,13	0,49	1,52
		H_i	14,39	1,06	0,04	1,10	38,76	45,74	84,50	Sablo-limoneuse	0,05	0,03	1,80
	P_2	H_s	10,43	9,20	0,09	9,29	44,07	36,21	80,28	Limono-sableuse	0,90	0,26	1,67
		H_m	7,08	4,65	4,21	8,86	39,05	45,01	84,06	Sablo-limoneuse	0,74	0,41	1,75
		H_i	10,08	2,88	2,38	5,26	38,41	46,24	84,65	Sablo-limoneuse	0,22	0,34	1,85
S_2	P_1	H_s	9,85	4,24	1,65	5,89	41,71	42,55	84,26	Sablo-limoneuse	0,32	0,12	1,48
		H_m	6,13	8,64	7,59	16,23	41,05	36,59	77,64	Sablo-limoneuse	1,11	0,62	1,59
		H_i	9,66	3,69	0,07	3,76	46,63	39,95	86,58	Sablo-limoneuse	0,12	0,07	1,58
	P_2	H_s	8,00	1,00	2,01	3,01	51,64	37,35	88,99	Sablo-limoneuse	0,03	0,08	1,55
		H_m	6,01	2,53	17,88	20,41	47,73	25,85	73,58	Limono-sableuse	0,83	0,40	1,73
		H_i	5,90	3,80	3,07	6,87	40,00	47,23	87,23	Sablo-limoneuse	0,57	0,39	1,75
S_3	P_1	H_s	14,29	14,44	13,39	27,83	30,04	27,83	57,87	Limono-sableuse calcaire	0,61	0,63	1,50
		H_m	15,10	13,23	13,17	26,40	31,59	26,90	58,49	Limono-sableuse calcaire	1,04	0,65	1,57
		H_i	27,63	10,66	1,47	12,13	30,60	29,64	60,24	Limono-argilo-sableuse calcaire	0,43	0,19	1,61
	P_2	H_s	20,56	20,76	1,56	22,32	30,02	27,10	57,12	Limono-argilo-sableuse calcaire	0,62	0,62	1,51
		H_m	20,13	12,49	8,66	21,15	30,86	27,85	58,71	Limono-argilo-sableuse calcaire	0,29	0,45	1,58
		H_i	27,17	11,41	1,99	13,40	28,37	31,05	59,42	Limono-argilo-sableuse calcaire	0,13	0,19	1,74

S	P	H	Moment	Hp (%)	CE (mmho s/cm)	pH	CEC (méq/100 g)	Les bases échangeables (méq/100g de sol)				∑bas.	Ts. G (%)	taux de saturation de chaque élément (%)				l'équilibre entre les éléments			MO (%)	$C_{.Org}$ (%)	N total (%)	C/N	P_2O_5 assimilable (ppm)	$CaCO_3$ total (%)	$CaCO_3$ actif (%)
								Ca	Mg	K	Na			Ca	Mg	K	Na	Ca/Mg	Mg/K	(Ca+Mg)/K							
1	1	H_s	**Avant**	6,79	0,029	7,96	12,50	6,46	1,28	0,80	0,76	9,30	74,40	51,68	10,20	6,40	6,08	5,05	1,60	9,68	0,45	0,26	0,167	1,56	127,35	0,85	0,13
			Après	0,78	0,049	7,01	5,00	2,12	1,08	1,27	0,11	4,58	91,60	42,40	21,60	25,40	2,20	1,96	0,85	2,52	1,69	0,98	0,168	5,83	165,55	0,85	0,63
		H_m	**Avant**	5,22	0,074	8,15	8,75	4,86	0,85	0,55	1,01	7,27	83,09	55,54	9,71	6,29	11,54	5,72	1,55	10,38	2,22	1,29	0,224	5,76	62,09	0,85	0,13
			Après	1,31	0,036	7,09	4,75	2,67	0,80	0,78	0,05	4,30	90,53	56,21	16,80	16,40	1,05	3,34	1,03	4,45	1,41	0,82	0,091	9,01	108,25	0,85	0,13
		H_i	**Avant**	5,67	0,053	7,20	7,50	4,12	1,23	0,43	1,35	7,13	95,07	54,93	16,40	5,73	18,00	3,35	2,86	12,44	0,34	0,20	0,165	1,21	62,08	0,42	0,13
			Après	2,16	0,029	7,19	5,00	2,94	0,87	0,35	0,43	4,59	91,80	58,8	17,40	7,00	8,60	3,38	2,49	10,89	1,03	0,60	0,068	8,82	44,57	0,42	0,13
	2	H_s	**Avant**	7,65	0,026	7,67	8,50	6,11	0,93	0,80	0,17	8,01	94,24	71,88	10,90	9,41	2,00	6,57	1,16	8,80	0,31	0,18	0,130	1,38	125,76	0,85	0,13
			Après	0,77	0,039	7,06	4,75	2,35	0,90	0,89	0,39	4,53	95,37	49,47	19,00	18,70	8,21	2,61	1,01	3,65	4,01	2,33	0,081	28,77	133,72	0,42	0,25
		H_m	**Avant**	5,59	0,081	7,45	7,50	5,32	0,74	0,48	0,58	7,12	94,93	70,93	9,87	6,40	7,73	7,19	1,54	12,63	0,52	0,30	0,156	1,92	68,45	0,85	0,13
			Après	0,90	0,044	7,21	3,75	1,11	0,60	0,89	0,13	2,73	72,80	29,60	16,00	23,70	3,47	1,85	0,67	1,92	1,53	0,89	0,321	2,77	114,61	0,85	0,13
		H_i	**Avant**	6,41	0,021	8,02	6,50	3,42	0,64	0,47	0,62	5,15	79,23	52,62	9,85	7,23	9,54	5,34	1,36	8,64	0,43	0,25	0,200	1,25	19,10	0,42	0,13
			Après	0,96	0,040	7,25	2,25	0,61	0,56	0,75	0,22	2,14	95,11	27,11	24,90	33,30	9,78	1,09	0,75	1,56	0,55	0,32	0,262	1,22	65,27	0,42	0,25
2	1	H_s	**Avant**	6,37	0,029	7,37	11,25	6,72	0,59	0,62	0,34	8,27	73,51	59,73	5,24	5,51	3,02	11,39	0,95	11,79	0,98	0,57	0,105	5,43	111,43	0,42	0,13
			Après	1,08	0,038	7,17	3,25	2,08	0,19	0,49	0,01	2,77	85,23	64,00	5,85	15,10	0,31	10,95	0,39	4,63	4,01	2,33	0,332	7,02	114,61	0,42	0,25
		H_m	**Avant**	5,82	0,027	7,52	9,75	7,44	0,70	0,68	0,51	9,33	95,69	76,31	7,18	6,97	5,23	10,63	1,03	11,97	0,93	0,54	0,119	4,54	27,06	0,42	0,13
			Après	2,03	0,036	7,28	2,75	1,55	0,28	0,46	0,23	2,52	91,64	56,36	10,20	16,70	8,36	5,54	0,61	3,98	2,15	1,25	0,435	2,87	84,37	0,42	0,13
		H_i	**Avant**	4,22	0,040	7,42	11,00	8,78	0,87	0,46	0,26	10,37	94,27	79,82	7,91	4,18	2,36	10,09	1,89	20,98	1,77	1,03	0,091	11,32	27,06	0,85	0,25
			Après	3,48	0,044	7,37	5,75	1,51	0,85	0,51	0,04	2,91	50,61	26,26	14,8	8,87	0,70	1,78	1,67	4,63	3,01	1,75	0,275	6,36	58,90	0,85	0,13
	2	H_s	**Avant**	6,76	0,030	7,25	8,25	6,77	0,37	0,58	0,01	7,73	93,70	82,06	4,48	7,03	0,12	18,3	0,64	12,31	3,08	1,79	0,113	15,84	90,74	0,85	0,25
			Après	0,78	0,041	7,24	2,00	0,77	0,38	0,43	0,02	1,60	80,00	38,5	19,00	21,50	1,00	2,03	0,88	2,67	1,57	0,91	0,164	5,55	4,78	0,85	0,63
		H_m	**Avant**	5,36	0,028	7,64	9,00	7,95	0,35	0,21	0,08	8,59	95,44	88,33	3,89	2,33	0,89	22,71	1,67	39,52	1,19	0,69	0,153	4,51	221,27	0,85	0,25
			Après	0,90	0,038	7,31	2,25	1,07	0,30	0,47	0,30	2,14	95,11	47,56	13,30	20,90	13,33	3,57	0,64	2,91	3,18	1,85	0,119	15,55	111,43	0,42	0,13
		H_i	**Avant**	7,69	0,033	7,44	8,75	6,19	0,83	0,56	0,16	7,74	88,46	70,74	9,49	6,40	1,83	7,46	1,48	12,54	0,45	0,26	0,096	2,71	151,23	0,85	0,25
			Après	0,95	0,025	7,10	3,50	1,52	0,80	0,58	0,15	3,05	87,14	43,43	22,90	16,60	4,29	1,90	1,38	4,00	1,08	0,63	0,151	4,17	7,96	0,85	0,13
3	1	H_s	**Avant**	17,60	0,088	8,03	20,00	11,90	3,49	1,65	1,15	18,21	91,05	59,60	17,50	8,25	5,75	3,42	2,12	9,34	2,46	1,43	0,292	4,90	1009,20	7,22	1,00
			Après	0,85	0,090	7,77	7,00	0,87	3,75	0,78	0,84	6,24	89,14	12,43	53,60	11,10	12,00	0,23	4,81	5,92	2,63	1,53	0,161	9,50	534,86	5,09	3,63
		H_m	**Avant**	17,90	0,272	7,90	18,25	10,50	3,13	1,10	2,80	17,50	95,89	57,37	17,20	6,03	15,34	3,35	2,85	12,36	0,93	0,54	0,154	3,51	259,47	8,07	2,00
			Après	1,32	0,133	7,87	12,50	3,38	3,59	0,49	1,15	8,61	68,88	27,04	28,70	3,92	9,20	0,94	7,33	14,22	2,10	1,22	0,215	5,67	46,16	9,76	4,13
		H_i	**Avant**	8,38	0,506	7,70	17,75	10,40	2,52	0,70	1,35	15,01	84,56	58,82	14,20	3,94	7,61	4,14	3,60	18,51	0,24	0,14	0,133	1,05	25,47	19,95	3,75
			Après	2,13	0,099	7,69	8,75	1,46	2,92	0,97	0,42	5,77	65,94	16,69	33,40	11,10	4,80	0,50	3,01	4,52	2,39	1,39	0,091	15,27	136,90	18,68	5,38
	2	H_s	**Avant**	14,3	0,060	7,97	20,25	14,10	2,25	2,1	0,62	19,10	94,32	69,78	11,10	10,40	3,06	6,28	1,07	7,80	1,91	1,11	0,140	7,93	856,42	5,09	1,38
			Après	0,79	0,073	7,35	13,75	1,37	3,41	1,24	0,08	6,10	44,36	9,96	24,80	9,02	0,58	0,40	2,75	3,85	2,61	1,52	0,105	14,48	463,23	5,97	0,87
		H_m	**Avant**	13,80	0,075	8,10	20,25	13,70	2,23	1,28	0,99	18,18	89,78	67,56	11,00	6,32	4,89	6,13	1,74	12,43	2,98	1,73	0,147	11,77	280,16	8,07	2,50
			Après	0,91	0,085	7,65	7,50	1,81	3,40	0,74	0,63	6,58	87,73	24,13	45,30	9,87	8,40	0,53	4,59	7,04	2,32	1,35	0,112	12,05	106,65	5,25	4,13
		H_i	**Avant**	15,20	0,071	8,23	17,75	12,80	1,37	0,6	1,09	15,86	89,35	72,11	7,72	3,38	6,14	9,34	2,28	23,62	2,18	1,27	0,133	9,55	25,47	17,83	5,00
			Après	0,96	0,110	7,74	13,75	1,58	2,87	0,38	0,31	5,14	37,38	11,49	20,90	2,76	2,25	0,55	7,55	11,71	2,82	1,64	0,070	23,43	191,02	13,16	0,63

Site (S)	Profil (P)	Horizon (H)	Le bilan ionique des profils culturaux (méq/l)									Somme des anions	Somme des cations
			Moment	Cl^-	CO_3^{2-}	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+		
S_1	P_1	H_S	Avant	1,22	0,00	0,40	0,34	0,56	0,61	0,51	2,05	1,96	3,73
			Après	3,00	0,00	0,80	1,63	1,79	1,13	0,70	0,81	5,43	4,43
		H_m	Avant	2,05	0,00	0,30	0,34	0,86	1,20	0,28	2,12	2,69	4,46
			Après	2,02	0,00	0,60	2,65	0,89	0,70	0,30	0,97	5,27	2,86
		H_i	Avant	1,58	0,00	0,40	0,68	1,03	3,95	0,29	2,02	2,66	7,29
			Après	2,00	0,00	0,60	1,03	0,40	0,47	0,19	1,79	3,63	2,85
	P_2	H_S	Avant	0,57	0,00	0,40	0,60	0,84	0,63	0,49	0,82	1,57	2,78
			Après	1,56	0,00	0,70	0,94	1,72	0,99	0,49	2,13	3,20	5,33
		H_m	Avant	1,47	0,00	0,50	0,86	0,86	0,85	0,34	2,49	2,83	4,54
			Après	0,84	0,00	0,80	2,63	0,97	0,85	0,59	1,01	4,27	3,42
		H_i	Avant	1,45	0,00	0,50	0,94	0,36	0,41	0,42	1,13	2,89	2,32
			Après	1,00	0,00	0,70	2,65	0,77	0,60	0,42	1,33	4,35	3,12
S_2	P_1	H_S	Avant	1,33	0,00	0,50	1,03	1,99	0,85	0,59	1,59	2,86	5,02
			Après	1,23	0,00	0,70	1,05	1,47	0,51	0,29	1,09	2,98	3,36
		H_m	Avant	0,70	0,00	0,40	0,86	1,55	0,71	0,25	2,06	1,96	4,57
			Après	1,94	0,00	0,50	1,08	0,76	0,51	0,28	0,84	3,52	2,39
		H_i	Avant	0,48	0,00	0,50	0,60	1,98	0,87	0,12	2,59	1,58	5,56
			Après	1,60	0,00	0,70	1,28	1,56	0,74	0,10	1,34	3,58	3,74
	P_2	H_S	Avant	1,33	0,00	0,50	1,11	1,97	1,19	0,51	1,28	2,94	4,95
			Après	0,74	0,00	0,80	2,65	1,21	0,54	0,25	0,59	4,19	2,59
		H_m	Avant	0,58	0,00	0,50	0,86	1,28	0,54	0,07	1,34	1,94	3,23
			Après	0,64	0,00	0,90	1,46	1,07	0,54	0,20	0,64	3,00	2,45
		H_i	Avant	1,49	0,00	0,60	0,94	0,90	0,55	0,09	1,56	3,03	3,10
			Après	0,80	0,00	0,90	1,20	0,96	0,41	0,64	0,87	2,90	2,88
S_3	P_1	H_S	Avant	0,40	0,00	1,30	1,28	1,91	1,37	0,56	2,59	2,98	6,43
			Après	0,90	0,00	1,35	2,59	1,95	1,62	0,11	2,56	4,84	6,24
		H_m	Avant	1,54	0,00	1,10	1,54	4,17	3,95	0,41	2,58	4,18	11,11
			Après	1,20	0,00	1,80	1,97	1,80	1,36	0,11	2,65	4,97	5,92
		H_i	Avant	5,20	0,00	0,90	1,71	4,44	5,98	0,10	2,82	7,81	13,34
			Après	1,06	0,00	1,70	2,40	1,61	0,79	0,04	2,53	5,16	4,97
	P_2	H_S	Avant	0,36	0,00	1,00	1,11	1,32	1,08	0,41	2,03	2,47	4,84
			Après	0,98	0,00	1,20	2,48	1,51	1,33	0,25	1,55	4,66	4,64
		H_m	Avant	0,16	0,00	1,10	0,86	1,53	1,01	0,21	1,97	2,12	4,72
			Après	1,16	0,00	1,40	2,14	1,61	1,04	0,10	2,58	4,70	5,33
		H_i	Avant	0,18	0,00	1,50	0,43	1,42	0,79	0,07	2,12	2,11	4,40
			Après	1,20	0,00	1,60	1,71	1,50	0,92	0,05	2,54	4,51	5,01