

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ DE SAÏDA « DR. TAHAR MOULAY »

FACULTE DES SCIENCES

DEPARTEMENT DE BIOLOGIE



Mémoire Élaboré en vue de l'obtention du diplôme de Master

Spécialité : Ecologie Végétale et Environnement

Option : Protection et gestion écologique des écosystèmes naturels

Présenté par

Mimouni Noura

Zeguiri Akila

--- ○○○○ ---

Sur le thème intitulé

La restauration écologique des propriétés physico-chimiques des sols forestiers dégradés par le pâturage à l'aide de compost

--- ○○○○ ---

Soutenu le : /06/ 2019

Devant la commission du jury, composée de :

**Mr. HENNI .M
Mr. ANTEUR.D
Mr. BORSALI A.H
Mr. ALLAM Ayoub**

**Maître de conférences –B - U de Saïda
Maître assistant -A- U de Saïda
Maître de conférences -A- U de Saïda
Doctorant 3^{ième} cycle U de Saïda**

**Président
Examineur
Encadreur
Invité**

Année académique 2018/ 2019

Résumé :

Sous le climat chaud et sec de l'ouest Algérien, la dégradation de la qualité des sols représente une contrainte importante pour les sols forestiers qui appartiennent à l'étage semi-aride. Dans cette étude, nous avons étudié l'effet de la restauration écologique par l'apport de compost sur les propriétés physico-chimiques des sols dégradés par le pâturage. Les analyses ont été effectuées après une année de l'application du compost.

Les résultats ont montré que l'amendement des sols pâturés par le compost a augmenté significativement l'ensemble de pH_{KCL} , conductivité électrique, calcaire total et la matière organique dans le sol. A l'inverse, on a enregistré une diminution significative de la perméabilité dans les sols restaurés. Alors que pour le pH_{EAU} , l'humidité, capacité de rétention et la porosité, une hausse a été constatée dans les placettes restaurées, cependant elle n'est pas significative. De même, l'analyse statistique des résultats de la densité apparente et la densité réelle a montré une légère diminution au niveau des sols restaurés.

Mot clé : Surpâturage, Restauration écologique, Sol Forestier, Semi-aride, Compost.

Summary :

In the hot and dry climate of western Algeria, degradation of soil quality is a major constraint for forest soils that belong to the semi-arid soil. In this study, we studied the effect of ecological restoration by adding compost to the physicochemical properties of soils degraded by grazing. The analyzes were carried out after one year of the application of the compost.

The results showed that the amendment of soils grazed by compost significantly increased the overall pH_{KCL} , electrical conductivity, total limestone and organic matter in the soil. Conversely, there has been a significant decrease in permeability in restored soils. While for pH_{EAU} , moisture, holding capacity and porosity, an increase was observed in the restored plots, however it is not significant. Similarly, statistical analysis of bulk density results and actual density showed a slight decrease in restored soils.

Keyword: Overgrazing, Ecological restoration, Forest Soil, Semi-arid, Compost.

ملخص :

يعتبر تدهور جودة التربة في المناخ الحار و الجاف غرب الجزائر، عائقاً رئيسياً لتربة الغابات ، التي تنتمي إلى التربة شبه القاحلة. في هذه الدراسة، درسنا تأثير الإستعادة البيئية عن طريق إضافة السماد العضوي إلى الخواص الفيزيائية و الكيميائية لتربة المتدهورة بالرعي. أجريت التحاليل بعد سنة واحدة من تطبيق السماد. أظهرت النتائج أن إستعادة أراضي الرعي بواسطة السماد زاد بشكل كبير في كل من: معدل حموضة كلوريد البوتاسيوم، التوصيل الكهربائي، الحجر الجيري الكلي و المواد العضوية في التربة. على عكس الإنخفاض الكبير في نفاذية التربة المستعادة. بينما بالنسبة لمعدل حموضة الماء ، الرطوبة، القدرة على الإمساك و المسامية، لوحظت زيادة في القطع المستعادة بنسبة قليلة . بينما أظهر التحليل الإحصائي لنتائج الكثافة الظاهرية و الكثافة الفعلية إنخفاضا طفيفا في التربة المستعادة .

الكلمات المفتاحية: الرعي الجائر، الإصلاح البيئي، تربة الغابات، شبه القاحلة، السماد العضوي.

Liste des tableaux

Tableau I-1 : Répartition des forêts denses par commune de milieu montagneux. 17

Tableau III-1: Quelques caractéristiques chimiques du compost utilisé 30

Tableau IV-1 : Propriétés physiques des sols restauré et leurs témoins..... 40

Liste des figures

| | |
|--|----|
| Figure I.1 : Répartition des forêts en Algérie (BNEDER, 2009)..... | 13 |
| Figure I.2 : Localisation de la wilaya de Saida..... | 14 |
| Figure I.3 : Carte des sols des monts de Saida(SATEC, 1976 modifiée) | 16 |
| | |
| Figure III.1: Présentation de la zone d'étude..... | 29 |
| Figure III.2: Illustration photographique d'une placette expérimentale d'apport in situ de compost | 31 |
| Figure III.3: Mesure de l'humidité. | 32 |
| Figure III.4 : Essai de la capacité de rétention. | 33 |
| Figure III.5 : Mesure de la perméabilité..... | 34 |
| Figure III.6 : Mesure de pH et pH _{KCL} | 36 |
| Figure III.7 : Dosage du calcaire total (CaCO ₃)..... | 37 |
| | |
| Figure IV.1: Représentation graphiques des propriétés chimiques après restauration (*: P<0,05 ; ** : P<0,01 ; *** : P<0,001 ; NS : non significatif). | 39 |

Liste des abréviations :

FAO: Food and Agriculture Organization

SER: Society for the Ecological Restoration

ETO : éléments traces organiques.

ETM : éléments traces métalliques.

ONA : Office national d'assainissement.

Dédicace

A la mémoire de ma mère

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement que j'ai pour toi.

Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être.

Je dédie ce travail qui n'aura jamais pu voire le jour sans les soutiens indéfectibles de mon cher papa qui ne cesse de me donner avec amour le nécessaire pour que je puisse arriver à ce que je suis aujourd'hui.

Je dédie aussi ce travail à :

- ❖ Mon futur mari.*
- ❖ Mes chères, sœurs AMEL, DALILA.*
- ❖ Mes frères YACINE, ZAKARIA, OTHMANE et NABILE, ADEM.*
- ❖ Ma belle-mère.*

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Introduction générale.....1

CHAPITRE I : Ressources forestières et édaphiques dans le bassin méditerranéen

| | |
|---|----|
| 1. Généralités sur les sols | 3 |
| 2. Origine, diversité et vulnérabilité des sols méditerranéens | 4 |
| 2.1. Origine et diversité des sols méditerranéens | 4 |
| 2.2. Vulnérabilité des sols méditerranéens | 6 |
| 2.3. Fonctions du sol | 7 |
| 3. Les ressources forestières dans le bassin méditerranéen..... | 8 |
| 4. Ressources forestières en Algérie..... | 11 |
| 4.1 Localisation et répartition | 12 |
| 4.2. Les principales menaces sur la forêt | 13 |
| 5. Ressources forestières et édaphiques dans la wilaya de Saïda | 14 |
| 5.1Caractères floristiques..... | 15 |
| 5.2. Caractères édaphiques..... | 15 |
| 5.2.1. La répartition des sols..... | 16 |
| 5.2.2. Les sols de plaines et vallées | 17 |
| 5.2.3. Les sols de montagne | 17 |
| 6. Causes de dégradation des sols..... | 17 |

CHAPITRE II : Restauration écologique des sols dégradés.

| | |
|---|----|
| 1. Généralités sur la restauration écologique..... | 19 |
| 1.1. Définition et concepts utilisés en restauration écologique | 19 |
| 2. Les étapes de la restauration écologique..... | 19 |
| 2.1. Planification de la restauration..... | 19 |
| 2.2. Suivi et évaluation..... | 20 |
| 2.3. Les attributs de la restauration écologique..... | 21 |

| | |
|--|----|
| 3. Concept de qualité des sols..... | 21 |
| 3.1. Restauration de la qualité des sols..... | 23 |
| 3.1.1. La qualité chimique des sols | 23 |
| 3.1.2. La qualité physique des sols | 24 |
| 3.2. Les apport de la restauration écologique | 25 |
| 4. Généralités sur les boues | 26 |
| 4.1. Composition des boues résiduaires | 27 |
| 4.2 Traitement des boues et leur devenir..... | 27 |
| 4.2.1. Traitement des boues | 27 |
| 4.2.2. Valorisation des boues | 27 |
| 5. Production des boues en Algérie..... | 28 |
| 6. Essais de restauration par des boues dans la wilaya de Saida..... | 28 |

CHAPITRE III : Matériels et Méthodes

| | |
|--|----|
| 1. Présentation de la zone d'étude | 29 |
| 2. Origine, choix et caractéristiques des composts utilisés..... | 30 |
| 3. Mise en place de l'expérimentation in situ par l'apport de compost..... | 30 |
| 4. Prélèvement du sol..... | 31 |
| 5. Analyses physico-chimiques des sols..... | 31 |
| 5.1. Les analyses physiques..... | 31 |
| 5.1.2. La texture..... | 31 |
| 5.1.1. Humidité..... | 32 |
| 5.1.3. Capacité de rétention..... | 33 |
| 5.1.4. Perméabilité..... | 33 |
| 5.1.5. La densité apparente, densité réelle et Porosité | 34 |
| 5.1.5.1. Détermination de densité apparente | 34 |
| 5.1.5.2. Détermination de densité réelle | 35 |
| 5.1.5.3. Détermination de la porosité totale..... | 35 |
| 5.2. Les analyses chimiques..... | 35 |
| 5.2.1. pH et pH _{KCL} | 35 |
| 5.2.2. Conductivité électrique (CE) | 36 |
| 5.2.3. Matière organique..... | 36 |

| | |
|---|----|
| 5.2.4. Dosage du calcaire total CaCO ₃ | 37 |
| 6. Analyses statistiques..... | 37 |

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION

| | |
|--|----|
| 1. Résultats..... | 38 |
| 1.2 Effet du compost sur les propriétés chimiques du sol..... | 38 |
| 1.3. Effet de composts sur les propriétés physiques du sol | 40 |
| 2. Discussion..... | 41 |
| Conclusion générale..... | 45 |
| Références bibliographiques..... | 47 |

Introduction générale

Les lieux dégradés regroupent l'ensemble des sites dont la surface est caractérisée par une carence ou une incapacité à supporter la végétation, généralement à la suite d'activités humaines telles que l'exploitation de ressources naturelles, l'urbanisation, l'établissement de sites d'enfouissement, surpâturage, etc (Recyc- Québec ,2016).

La désertification avance inexorablement, l'environnement et les ressources de la biodiversité n'ont jamais été aussi menacés, les superficies reboisées sont annihilées par les pertes dues aux feux de forêts qui sont les facteurs de destruction des écosystèmes forestiers les plus significatifs aggravés par le surpâturage qui empêche le renouvellement naturel et artificiel des peuplements forestiers. (Borsali, 2014)

Les sols méditerranéens sont généralement fragiles et vulnérables, et ce, pour plusieurs raisons : les précipitations irrégulières et souvent violentes favorisent l'érosion ; l'importance des pentes aggrave le phénomène ; les températures élevées accélèrent la décomposition de la matière organique et les sécheresses ralentissent la production de nutriments ; la productivité végétale est souvent réduite à cause de la dureté du climat et de la récurrence des incendies. (Guénon .R, 2010).

Parmi les nombreuses atteintes portées aux ressources naturelles, la dégradation des sols reste, malgré ses lourdes conséquences, relativement méconnue. Ressource non renouvelable assurant de multiples fonctions, le sol est pourtant victime de nombreuses agressions d'autant plus préoccupantes qu'à l'heure actuelle (Burrow, 2015)

L'activité de l'élevage depuis sa pratique vise à assurer la nourriture et la survie de l'homme. Ceci a imposé un point de discordance entre l'éleveur et le forestier. Les populations riveraines vivant en permanence au contact de la forêt utilisent encore de nos jours des méthodes traditionnelles de conduite des troupeaux ». (Benabdeli ,1996), Selon le même auteur, l'élevage est une entrave au développement des secteurs agricoles et forestier, car c'est dans ces espaces qu'une partie du déficit sera prélevée.

La dégradation des sols se manifeste par une réduction de la qualité et de la capacité du sol à remplir ses fonctions écologiques (Lal, 2012). Pour les sols forestiers, la dégradation découle de processus physiques (ex. compactage du sol par la machinerie et érosion par l'eau et le vent), chimiques (ex. appauvrissement en nutriments par la

récolte, acidification par les dépôts atmosphériques acides), et biologiques (ex. perte de couverture morte par la préparation de terrain, perte de biodiversité (Lal, 2009). Dans les forêts naturelles, le pâturage constitue un facteur de dégradation redoutable par son agressivité et les dégâts qu'il cause à la végétation et au sol. Dans les reboisements, les effets sont plus graves, pour des raisons liées aux spécificités des peuplements artificiels qui diffèrent des formations naturelles (Benabdelli, 1996).

La restauration de lieux dégradés a généralement comme objectif de changer ou de rétablir la vocation de ces sites, ou encore de les réintégrer dans leur milieu environnant. La restauration d'un sol consiste donc, entre autres, à rétablir les structures et les processus écologiques qui lui sont associés. Les résultats des travaux de Borsali et al, 2014 réalisés dans la wilaya de Saida effectués sous un climat semi-aride, ont montré que l'apport de compost augmente rapidement (dès 6 mois) les teneurs en matière organique et en eau, éléments la plupart du temps limitant dans les sols Méditerranéens surtout dans ses zones sensibles et très dégradés. L'apport de composts s'est avéré efficace pour restaurer, au niveau d'un écosystème du semi aride, les propriétés physicochimiques des sols perturbés en redynamisant ainsi ces fonctions en moins d'un an (Borsali et al, 2014)

La présente étude s'inscrit dans un cadre général de la conservation, de la gestion intégrée et de la mise en valeur du massif forestier de Djebel Keroua, prenant en considération le surpâturage qui influe directement la conservation de l'écosystème forestier de la zone en question, dont l'objectif est de faire restaurer les propriétés physico-chimiques des sols mise sous pâturage par l'apport de composte issue d'une station d'épuration des eaux usées.

1. Généralités sur les sols

Le sol est formé d'une mince pellicule de quelques centimètres à quelques mètres situé à l'interface de la lithosphère, de l'atmosphère, de l'hydrosphère et de la biosphère, le sol résulte de l'altération de la roche mère sous l'effet du climat et de l'activité biologique (Girard et al, 2011).

Ce processus s'étend sur plusieurs millénaires ce qui fait du sol une ressource particulièrement fragile puisque non renouvelable à l'échelle humaine. Par conséquent sa protection doit faire l'objet de la plus grande attention (Burrow, 2015).

Dans un premier temps, la roche mère subit une désagrégation physique qui la fractionne en morceaux de différentes tailles sous l'effet conjugué du vent, du gel et de l'eau. Puis les roches subissent une altération dit biogéochimique que modifie leur composition minéralogique. Cette altération des minéraux primaire conduit à la formation des minéraux secondaires qui s'altèrent à leur tour par l'effet de l'activité biologique et du climat (Burrow, 2015).

Un sol qui se forme se caractérise par l'imbrication étroite d'un ensemble de particules minérales de taille et de nature variées (argiles, sables et limons) avec la matière organique issue de la dégradation des êtres vivants. L'organisation de ces différents constituants organiques et minéraux est à l'origine d'une succession de couches pédologiques relativement homogènes appelées horizons (Burrow, 2015).

Les proportions respectives des différentes particules minérales vont influencer la texture du sol et par là même ses caractéristiques agronomiques, la texture influence d'ailleurs directement la structure, autre propriété du sol essentielle à sa fertilité. Celle-ci peut être définie comme étant le mode d'assemblage des constituants solides du sol, minéraux et/ou organiques, qui peuvent s'agréger ou non. La structure d'un sol détermine en premier lieu la porosité, c'est-à-dire la quantité et l'arrangement des vides du sol (Gobat et al, 2010).

L'architecture de ce réseau de pores revêt une importance capitale pour la fertilité d'un sol puisqu'elle va définir son aptitude à l'infiltration de l'eau, à son stockage et à sa disponibilité pour les plantes (Stengel et al, 2009).

Outre cette fraction inerte, de nombreux organismes vivants trouvent refuge dans le sol ou ils participent à sa formation, son évolution et agissent sur ses propriétés

physico-chimiques et sur les fonctions qu'il remplit . La complexité et l'hétérogénéité du système sol engendrent en effet un grand nombre de niches écologique à coloniser (Lohm et persson, 1977) d'où une diversité d'organismes très élevée allant des bactéries à la pédofaune en passant par les champignons, les algues et les plantes.

Au rang des interactions entre le sol et les êtres vivants qu'il abrite, on peut citer entre autres les flux d'éléments nutritifs au niveau de l'interface sol-racine appelée rhizosphère ; la contribution des micro-organismes aux cycles biogéochimique ou encore la dégradation de la matière organique par les organismes de la pédofaune.

2. Origine, diversité et vulnérabilité des sols méditerranéens

2.1. Origine et diversité des sols méditerranéens

Les sols méditerranéens sont des sols qui se sont formés sous un climat méditerranéen (Verhey, 2010). Depuis des millénaires, les interactions multiples entre les processus naturels de pédogénèse et les activités humaines ont conduit à la formation des sols méditerranéens tels que nous les connaissons aujourd'hui. Dès le Néolithique, où pense-t-on les systèmes agraires reposaient sur la technique de la culture itinérante après « abatis-brûlis », avec des effets fortement érosifs sur certains sols, l'homme a contraint son environnement parfois bien au delà de ce que ce dernier pouvait supporter. Rares sont les sols méditerranéens qui ont pu évoluer sans être marqués plus ou moins profondément par l'action directe ou indirecte de l'homme. (Guenon, 2011)

Les sols de la région méditerranéenne sont extrêmement variés du fait de la grande diversité des roches-mères et de la variété des pentes. Ils sont généralement placés sur un substrat géologique sédimentaire reposant sous un sol métamorphosé. On observe par endroits des terrains volcaniques souvent anciens ou des affleurements cristallins très localisés (Borsali ,2014).

Fondamentalement, ces sols sont fragiles à l'exception de ceux situés dans les grandes plaines alluviales (M'herit, 1999). Les sols méditerranéens présentent une grande diversité en raison de la grande variabilité des facteurs naturels (climat, végétation, physiographie, géologie et lithologie) qui conditionnent leur formation et leur répartition. Parmi la large gamme de types de sols rencontrés, l'un est spécifique de la région méditerranéenne : les sols rouges méditerranéen sous sols fersiallitiques dont fait partie la *terra rosa* rencontrée en zone karstique. Ces sols fersiallitiques sont de

bons sols agricoles ou forestiers, à la condition qu'ils soient protégés de l'érosion. Ils sont en effet particulièrement sensibles à l'érosion éolienne ou hydrique, sur tout dans la situation de découverte végétale dans laquelle ils se retrouvent après un incendie ou par suite du surpâturage. L'érosion réduit ces sols à des sols squelettiques autour de croûtes calcaires stériles. Globalement, les sols méditerranéens sont souvent fragiles, soumis à des actions anthropiques importantes et rajeunis par l'érosion. Ils sont alors peu profonds, peu différenciés et pauvres en matière organique. Ils ont une capacité de réserve en eau faible, ce qui est un lourd handicap pour des régions où les précipitations sont très insuffisantes pour assurer la croissance des plantes. Néanmoins, il existe aussi, dans ces régions, des sols profonds, bien structurés, souvent plats ou peu pentus et retenant bien l'eau, notamment dans le CIHEAM en 1993 a fait une description des principaux sols méditerranéens qu'il est possible de récapituler comme suit :

□ **Fluvisols** (FAO, 1988 Fluvents – SoilTaxonomy, 1975): Sols peu évolués non climatiques d'apport alluvial - CPCS, 1967 Jeunes sols alluviaux parmi les plus fertiles de la région ; presque tous sont riches en bases ou sont légèrement calcaires. Ce sont des sols très importants pour l'agriculture ; ils apparaissent dans des zones planes autour des principaux cours d'eau comme l'Ebre et le Rhône. Ils sont adaptés à une grande diversité de culture et sont très productifs, surtout lorsqu'ils sont irrigués.

□ **Régosols** (FAO, 1988 Orthents–SoilTaxonomy, 1975) : Sols peu évolués non climatiques d'apport alluvial ou marin - CPCS, 1967 Jeunes sols qui apparaissent sur des terrains tendres ou meubles, souvent pentus ; ils sont peu évolués ou constamment rajeunis par l'érosion. La topographie et le stress hydrique sont leurs principales limitations même si certains, à texture plus fine, sont fertiles. Lorsque la topographie est favorable ils peuvent porter des cultures de céréales, ou de l'arboriculture irriguée. Dans les régions montagneuses et vallonnées, ces sols sont soit pâturés de manière extensive soit restent sous couvert forestier. On les trouve aussi associés aux dunes de sable ou aux sols récents déposés dans les déserts.

□ **Leptosols** (FAO, 1988 Orthens - SoilTaxonomy, 1975) : Sols minéraux bruts CPCS, 1967 Sols très peu profonds, apparaissant généralement sur des terrains de roches dures pentus à très pentus. Ces sols très sensibles à l'érosion devraient être laissés sous une végétation naturelle protectrice. Lorsqu'ils sont abîmés des mesures

de conservation devraient être prises. Ils sont très présents en région méditerranéenne. La forêt et le pâturage extensif contrôlé sont les utilisations les plus adaptées.

□ **Rendzicleptosols** (FAO, 1988 Xerosols - SoilTaxonomy, 1975 Rendzines - CPCS, 1967) : Sols, toujours sur roche mère calcaire, riches en humus, souvent peu profonds, avec des taux élevés en graviers ; ils apparaissent souvent sur des terrains accidentés. Sur des pentes faibles, le développement d'une agriculture intensive est possible (olives, figues, vignes, orge, légumes, pâtures d'hiver). Sur les sols les plus en pente la forêt et le pâturage extensif contrôlé sont les utilisations les plus recommandées.

□ **Vertisols** (FAO, 1988) : Sols souvent profonds et homogènes, caractérisés par des teneurs élevées en argiles gonflantes. Ils sont particulièrement représentés au Moyen Orient et au Maghreb. Ces sols sont à bon potentiel agricole mais ils doivent faire l'objet de pratiques agricoles spécifiques pour assurer un rendement durable peu aptes à l'agriculture de subsistance. A moins de disposer de puissants moyens de mécanisation et d'irrigation, ces sols sont plutôt destinés au pâturage.

□ **Luvisols chromiques** (FAO, 1988 Rhodoxeralfs - SoilTaxonomy, 1975) : Sols rouges méditerranéens CPCS, 1967. Sols généralement décarbonatés, mais riches en bases ; ils se développent sur différents matériaux. Les plus connus sont les terra rossa développées sur du calcaire dur. Dans les montagnes de Grèce, d'Albanie, d'Italie, de Turquie, ils sont de type caillouteux. Beaucoup sont dégradés, à cause des cultures, de la déforestation et du surpâturage. Ils sont encore largement utilisés dans tous les pays méditerranéens pour des cultures très diverses.

□ **Calcisols** (FAO, 1988 Eurochrepts - SoilTaxonomy, 1975) : Sols comportant souvent une accumulation significative de carbonate de calcium à leur base ; ils apparaissent sous les climats méditerranéens les plus secs. En Afrique du Nord, ce sont surtout des terrains peu pentus utilisés pour les céréales d'hiver et pour l'élevage extensif. En Espagne (Andalousie) et en Turquie (Anatolie de l'Ouest) ces sols se trouvent sur des reliefs vallonnés ou montagneux et sont souvent caillouteux. Les principales utilisations sont alors la vigne, le pâturage ou la forêt.

2.2. Vulnérabilité des sols méditerranéens

La protection des sols dans le bassin méditerranéen est devenue une préoccupation importante dès la haute Antiquité, en témoignent les vestiges de différentes catégories d'ouvrages d'aménagement hydro-agricole de cette époque (Skouri, 1994). L'homme

a donc occupé et utilisé les sols de différentes manières alternant les phases d'utilisation intense notamment, jusqu'à leur abandon total permettant des évolutions purement naturelles constituées de formations ligneuses et herbacées assurant la protection des sols contre l'érosion hydrique et éolienne (Guenon, 2011). L'abandon de la culture nomade au détriment de la sédentarisation s'est donc produit avec l'apparition de l'agriculture et l'élevage qui ont connu un essor considérable notamment à l'apogée de la civilisation grecque et romaine. L'eau étant de loin le facteur limitant principal de l'agriculture en région méditerranéenne et d'une façon générale de la productivité, l'homme a dû recourir à l'irrigation imposée par l'aridité du climat avec tous les effets négatifs que cela encourt. De fait, l'érosion et la salinisation des sols ont constitué les principales causes de dégradation des sols méditerranéens dans le passé (Lahmar et Ruellan, 2007). Par ailleurs, le feu a été largement utilisé pour ouvrir les milieux et créer de grandes zones agricoles et de pâturage, mais également dans le but de fertiliser les sols. Ceci a largement contribué à leur érosion en particulier dans les zones de forte pente, conduisant à la perte de matière organique et donc de cohésion et de fertilité des sols (Guenon, 2011) (Borsali, 2014).

2.3. Fonctions du sol

Le sol, compartiment essentiel des écosystèmes et ainsi un système écologique vivant, complexe et dynamique aux nombreuses fonctions. Ces fonctions interviennent dans la majorité des services écosystémiques énoncés dans le cadre de l'Evaluation des Ecosystèmes pour le Millénaire ou «Millennium Ecosystem Assessment» (MEA, 2005). si l'on reprend cette classification, les services liés au sol sont représentés dans plusieurs catégories. Au sein des services dits d'approvisionnement, on peut citer la production agricole

- le sol étant le lieu de la production végétale, source de fibres et d'alimentation pour l'homme et pour l'animal
- la production de biomasse pour l'énergie, notamment via la production forestière, et la production de la matières premières pour le bâtiment et l'industrie (gravés, sables, pierres, métaux, ect.) .

le sol héberge également un immense patrimoine biologique encore peu connu qui fournit ou pourrait fournir dans le futur des produits biochimiques et pharmaceutiques.

Plusieurs services de régulation sont également assurés par les sols :

- régulation de l'effet de serre via le stockage de carbone (près de 80 % du carbone terrestre est stocké dans le sol) ,
- régulation des inondations ou encore filtration de l'eau via l'action d'épuration des micro-organismes. (Burrow, 2015)

Le sol constitue aussi un patrimoine géologique, paysager et archéologique important et apporte donc des services culturels. Enfin, les services de support, nécessaires à la fourniture de tous les autres services, reposent eux aussi majoritairement sur la ressource sol : cycle des nutriments, production primaire et présence du sol lui-même en tant que support des animaux et des végétaux sont autant de fonctions assurées par cette ressource. (Burrow, 2015)

Ces différents services apportés par le sol dépendent de l'existence et de l'activité des communautés d'êtres vivants précédemment citées. Or, sous l'effet des perturbations anthropiques, celles-ci peuvent être profondément perturbées et de ce fait ne plus pouvoir accomplir leurs fonctions. Ce peut être le cas dans les sols d'écosystèmes fortement anthropisés que sont les urbains.

La fertilité d'un sol est donc sa potentialité à assumer pleinement les diverses fonctions de fourniture de nutriments, de l'eau et le maintien des conditions optimales de température, d'oxygène et du pH. (Kefifa, 2014)

2. Les ressources forestières dans le bassin méditerranéen

Sur le plan végétal, les milieux méditerranéens se caractérisent avant tout par une grande diversité, résultat d'un ensemble de facteurs que Braudel assimile à « une somme interminable de hasards, d'accidents, de réussites répétées. » (Braudel, 1985).

Selon Médail sur le pourtour méditerranéen, les multiples événements paléogéographiques et les cycles climatiques contrastés ont aussi permis l'émergence de cette biodiversité inhabituellement élevée (Quézel, 1985 ; Médail&Quézel, 1997).

L'organisation de la végétation actuelle résulte en premier lieu des instabilités climatiques survenues durant le Pliocène et le Pleistocène (Suc, 1984 ; Beaulieu *et al.*, 2005). De plus, l'ancienneté de l'impact humain a eu de profondes conséquences

sur l'organisation des paysages et la diversité des écosystèmes méditerranéens (ex. Allen, 2001). Même s'il a traversé avec plus ou moins de succès le crible de grandes crises comme les glaciations du Pléistocène (Svenning, 2003), cet héritage biologique s'avère encore fragilisé par la rapidité et l'ampleur des changements environnementaux existant sur le pourtour méditerranéen (Sala *et al*, 2000 ; Mazzoleni *et al*, 2004).

Les grandes variations paléo-climatiques ont donné d'abord naissance à des successions de formations végétales et de sols dont de multiples reliques se sont conservées grâce, notamment, à la topographie accidentée, qui contribue à la fragmentation du milieu aux plans édaphique et microclimatique. De plus, les écosystèmes méditerranéens, situés entre des zones tempérées et désertiques, présentent toute une gamme de situations marquées par la transition et l'influence de ces milieux. Ainsi, les flores et les faunes de différentes origines biogéographiques coexistent, survivants de formations soit tempérées soit tropicales qui y ont existé avant même l'apparition du climat méditerranéen. Enfin, l'occupation humaine, forte et ancienne, a profondément modifié le milieu à travers les activités diverses mais surtout agricoles et d'élevage. C'est ainsi une végétation spécifique et adaptée, c'est-à-dire xérophile (adaptée à la sécheresse), thermophile (adaptée à la chaleur) et frugale (adaptée aux sols pauvres) qui s'est installée. Les espèces arborées rencontrées en région méditerranéenne diffèrent de celles présentes ailleurs en Europe sous des conditions de précipitations et de températures moyennes annuelles similaires. (Borsali, 2014)

La flore méditerranéenne est ainsi riche de plus de 25 000 espèces dont près de 13 000 sont endémiques (Nandin, 2008 ; WWF, 2001) environ 11700 (52 %) ne se trouvent nulle part ailleurs dans le monde. Les espèces endémiques sont principalement concentrées sur les îles, les péninsules, les falaises rocheuses et les pics montagneux. L'endémisme à un plus haut niveau est très réduit, avec seulement deux familles endémiques (Phyllanthaceae et Drosophyllaceae), tous deux représentées par une seule espèce, *Aphyllanthes monspeliensis* et *Drosophylla caelusitanicum*.

La région méditerranéenne abrite un haut degré de richesse et d'endémisme chez les arbres (290 espèces d'arbres indigènes dont 201 espèces endémiques). Un certain nombre d'arbres sont des espèces phares, comme les cèdres (exemple du Cèdre du Liban, *Cedrus libani*), l'arganier (*Argania spinosa*), et dattier de Crête (*Phoenix theophrasti*). Le seul palmier originaire de la Méditerranée, *Phoenix theophrasti*, se

trouve dans une petite partie de la Crète et la Turquie sur la péninsule de Datca, deux régions du bassin méditerranéen où on rencontre un tourisme en plein essor.

Le bassin méditerranéen regroupe ainsi entre 9 et 10 % des espèces végétales identifiées dans le monde sur seulement 1,5 % de la surface terrestre. , le type de végétation le plus répandu est le matorral à Juniperus, Myrtus, Oleas, Phillyrea, Pistacia et Quercus. Certains éléments importance de la végétation méditerranéenne (*Arbutus*, *Calluna*, *Ceratonia*, *Chamaeropset Laurus*) sont les vestiges des forêts anciennes qui ont dominé le bassin durant deux millions d'années. (Nandin, 2008 ; WWF, 2001 in Borsali, 2014)

Cette diversité spécifique s'accompagne d'une grande diversité des habitats comme en témoigne l'inventaire CORINE-BIOTOPE23 qui fait apparaître pas moins de 11 types d'habitats forestiers et 5 types d'habitats de landes ou fruticées. Ainsi, en France, sur les 1743sites du réseau Natura 2000, on dénombre 398 sites (soit environ 23 % des sites sur moins de 15 % du territoire métropolitain) en région méditerranéenne (Languedoc-Roussillon, Provence-Alpes-Côte d'Azur, Corse, Ardèche et Drôme).

Les écosystèmes forestiers sont répartis en différents groupes de végétation (Quézel, 1976) comme suit:

- la brousse thermophile à oléastre et pistachier:
- les forêts de conifères méditerranéens de pin d'Alep, pin Brutia, pin maritime, pin pignon, thuya de Berbérie et genévrier de Phénicie;
- la forêt sclérophylle de chênes à feuilles persistantes: chêne vert, chêne-liège, chêne Kermès, etc.;
- les forêts caducifoliées de chêne zeen, de chêne afarès, de chêne du Liban, de chêne tauzin, de charme, de frêne et rarement de hêtre;
- les forêts de montagne ou de haute altitude, de cèdres, de pins noirs et de sapins;
- les peuplements arborés de l'étage oroméditerranéen de genévriers arborescents et de xérophytes épineux.

Dans les écosystèmes arides de steppe et de désert, la végétation naturelle est en général basse et clairsemée en raison de l'insuffisance ou de l'irrégularité des précipitations et de la faiblesse de l'humidité relative. Les steppes arides correspondent à des pluviosités comprises entre 100 mm et 400 mm, produisant

parfois des peuplements, des forêts ou de la brousse, ou le plus souvent de la steppe *stricto sensu*. Les paysages caractéristiques de ces bioclimats arides sont:

- forêt ou brousse à arganier;
- brousse à pistachier atlantique et jujubier;
- brousse à acacia;
- steppes à graminée (alfa), à suffrutex (armoïse et salsolacées). Ces steppes sont essentiellement utilisées pour le pâturage ovin.

Le désert occupe dans la région les plus grandes étendues de terres et les écosystèmes les plus caractéristiques de ces milieux sont en rapport avec le substrat sableux. Ils s'organisent aussi en plusieurs communautés végétales susceptibles de jouer un rôle fondamental dans la lutte contre le processus d'ensablement. (M'Hirit, 1999)

4. Ressources forestières en Algérie

Le patrimoine forestier couvre une superficie globale estimée à 4.700.000 ha soit un taux de boisement de 11% pour le Nord de l'Algérie y compris la zone steppique (Plan National de Reboisement, DGF.1999 actualisé en 2008 in Ghazi, 2009). Cette surface comprend :

1.428.000 ha de forêts naturelles (30,30%) ; 1.662.000 ha de maquis (35,36%) ; 717.000 ha de reboisement (15,25%) ; 240.000 ha de vides (5,10%) et 653.000 ha autres (13,99%). La nature juridique se présente comme suit : forêts domaniales : 4.035.000 ha ; forêts privées : 350.000 ; forêts communales : 215.000 ha ; forêts autogérées : 100.000 ha.

La majorité des peuplements forestiers bien venant sont constitués de jeunes plantations dont la croissance est liée aux conditions climatiques et aux travaux sylvicoles.

Compte tenu de tous les éléments historiques qui la marquèrent et des pressions qu'exercent sans cesse sur elle, l'homme et son bétail, la forêt semble glisser rapidement sur la voie d'une dégradation progressive des essences principales et de son remplacement par le maquis et les broussailles dont le rôle reste néanmoins extrêmement important pour le contrôle et la fixation des sols en terrain à forte déclivité. (Kefifa, 2014)

En Algérie la déforestation est importante, un aperçu sur l'évolution des surfaces le confirme :

- la superficie forestière initiale de l'Algérie est estimée par plusieurs auteurs et forestiers à 7 millions d'hectares avant 1800, en 1830 elle n'était que de 4 millions d'hectares, en 1953 seulement 3.298.000 et en 1967 près de 2.233.000 hectares. En prenant en considération les broussailles et les maquis bas dégradés dont la superficie est estimée à 720.000 hectares notre couverture végétale forestière est de l'ordre de 2.953.000 hectares.

Cette situation permet les remarques suivantes :

- sur les 2.380.000 hectares de forêts (chiffre récent) plus de 780.000 sont considérés comme ruinés et à un stade régressif irréversible, - en 1983 la couverture végétale forestière est estimée à 2.400.000 hectares dont 1.800.000 de maquis.

Les chiffres ne coïncident pas entre eux, ce qui reflète la dynamique régressive et les agressions constantes que supportent les écosystèmes forestiers. Les pressions qui s'y exercent sont toutes dues aux activités humaines volontaires ou planifiées. Mais, l'homme par son action et ses pratiques, ainsi que des facteurs physiques contribuent à la destruction du potentiel naturel, nous poussant à faire un diagnostic des contraintes. (FAO, 2001)

2.1. Localisation et répartition

L'Algérie est située au nord-ouest de l'Afrique, dans ce qu'on appelle le Maghreb, elle couvre une superficie de 2 388 millions de km² ce qui en fait, en étendue le premier pays africain.

Le Sahara l'un des plus vastes déserts du monde en occupe plus de 2 millions de km² soit 84% du territoire. Les régions du nord de l'Algérie où les conditions de climat et de milieu permettent le développement des formations forestières occupent 250 000 km² soit un peu plus de 10% de la superficie totale. (DGF, 2007)

Les forêts algériennes occupent tous les bourrelets montagneux de l'Atlas Tellien et les crêtes ou versants pluvieux de l'Atlas Saharien (Figure I-1). Elle est méditerranéenne et est localisée entièrement sur la partie septentrionale du pays et limitée au sud par les monts de l'atlas saharien. Elle est inégalement répartie suivant les différentes régions écologiques, ce qui leur confère des taux de boisements très variables. En effet, ces taux décroissent d'Est en Ouest et du Nord au Sud plus particulièrement. La forêt algérienne est constituée par une variété d'essence appartenant à la flore méditerranéenne, leur développement est lié essentiellement au

climat. Au fur et à mesure que l'on s'éloigne du littoral, le faciès change du nord au sud du pays on peut distinguer deux principales zones bien différentes : (DGF, 2007)

□ Le littoral et surtout les chaînes côtières de l'est du pays comme : la grande Kabylie, Béjaïa, Jijel, Collo, Mila, El Kala. Ces régions sont bien arrosées, elles comportent les forêts les plus denses et les plus belles. C'est l'aire de répartition de deux essences principales (le chêne liège et le chêne zeen).

□ Les hautes plaines continentales, plus sèches sont représentées par les régions situées entre les chaînes côtières et l'atlas saharien à savoir les Aurès, Djelfa et Saïda. Ces zones contiennent dans leurs parties accidentées de grands massifs de pin d'Alep et de chêne vert. (Ouelmouhoub, 2005)



Figure I-1 : Répartition des forêts en Algérie (BNEDER, 2009)

2.3. Les principales menaces sur la forêt

La forêt Algérienne se caractérise par un état de dégradation avancé, résultant des effets conjugués des incendies, du défrichement, des pacages, des constructions illicites ainsi que d'attaques parasitaires et d'autres facteurs de dégradation.

L'action combinée de ces différents facteurs (feu, exploitation inconsidérée des pâturages abattage des forêts, utilisation irrationnelle, consommation anarchique

d'espace par étalement urbain, mise en culture) est préjudiciable aux forêts algériennes qui, non seulement ont régressé, mais ce qui en subsiste ne représente plus les forêts naturelles équilibrées d'autrefois, à cause de la dégradation générale qui les caractérise. (Meddour, 2014)

5. Ressources forestières et édaphiques dans la wilaya de Saïda

La wilaya de Saïda couvre une superficie de 6613 km² ; le chef lieu (commune de Saïda) elle est limitée naturellement au nord par la wilaya de Mascara, au sud par celle d'El Bayadh, à l'est par la wilaya de Tiaret et à l'ouest par la wilaya de Sidi bel Abbés (Figure I-2).



Figure I-2: Localisation de la wilaya de Saïda

5.1. Caractères floristiques

Les terres forestières représentent 19 729 ha soit 26 % de la superficie totale. Ces terres forestières comprennent les formations forestières naturelles qui regroupent les forêts denses, les forêts claires, les maquis denses et les maquis clairs. Ces formations sont totalement localisées dans la partie tellienne de la wilaya où se trouve les communes de Doui Thabet, Sidi Boubkeur, Youb et Balloul. Les terres forestières constituées de forêts de pin d'Alep, de thuya de berberie, de genévrier oxycèdre et de chêne vert ; de formations basses comme la garrigue, le maquis et le matorral ou les broussailles avec les essences secondaires comme la filaire, le lentisque, le genêt, le doum, le Diss et l'alfa. Les forêts occupent environ 16380 ha soit 21 % de la superficie totale. Ces forêts représentent 7.5 % des superficies forestières (**Tableau I-1**), l'essence dominante dans ces forêts est le pin d'Alep essentiellement pur ou en association avec le Thuya. (Terras, 2011).

Tableau I-1 : Répartition des forêts denses par commune de milieu montagneux.

| commune | Superficies (ha) | Superficie totale forêts dense (%) | Commune (%) |
|---------------|------------------|------------------------------------|-------------|
| Youb | 280 | 1,70 | 0,63 |
| Doui Thabet | 8415 | 51,37 | 38,83 |
| Sidi Boubkeur | 2180 | 13,31 | 8,88 |
| Sidi Amar | 3900 | 23,81 | 28,04 |
| Ouled Brahim | 1180 | 7,20 | 4,65 |
| Ouled Khaled | 425 | 2,59 | 2,05 |
| Total Monts | 16380 | 100 | 78,33 |

Source :D.G.F 2007

5.2. Caractères édaphiques

Le sol constitue une ressource naturelle peu connue en Algérie au regard de l'absence d'une cartographie à une échelle donnée une classification permettant de suivre leur évolution.

5.2.1 La répartition des sols

La répartition des sols obéit aux conditions générales qui régissent le milieu naturel. Orographie, lithologie, occupation du sol et climat agissent ensemble tant dans l'évolution des sols que dans leur extension spatiale. Une plus grande diversité de sols se trouve dans la partie Nord des monts de Saida (Conservation des forêts de Saida, 2007).

Les données disponibles sur les ressources en sol des monts de Saida sont très mal connues. En effet très peu d'études ont été réalisées au niveau de cet espace (Kefifa, 2014). Les plus récentes sont celles décrits et répertoriés par l'étude pédologique réalisée par SATEC, 1976 et le B.N.E.D.E.R (1992) (Figure I-3).

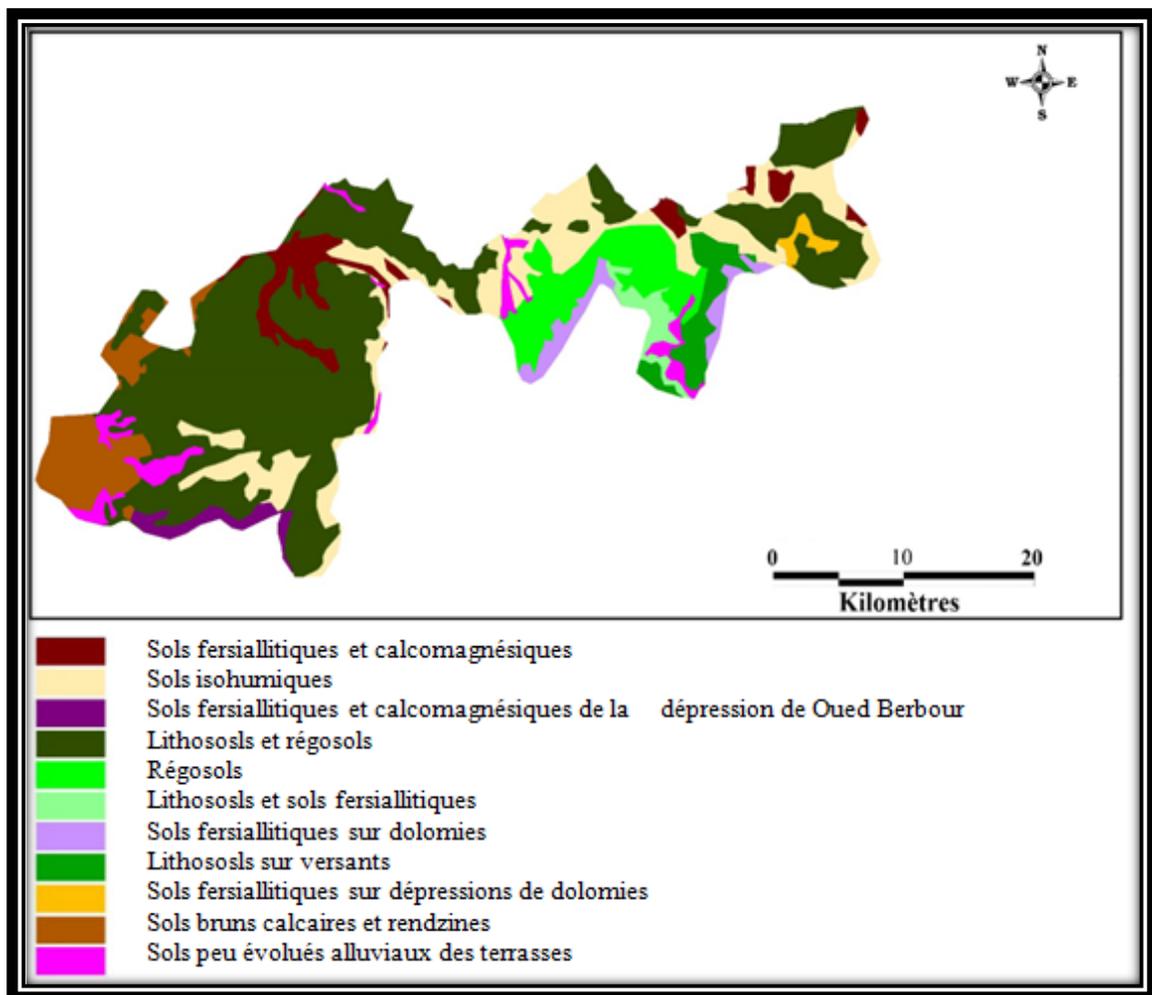


Figure I-3 : Carte des sols des monts de Saida (SATEC, 1976 modifiée)

D'après les services de la conservation des forêts de Saïda, 2007). La wilaya regroupe selon les formations pédologiques deux types de sols.

5.2.2. Les sols de plaines et vallées

Dans les petites plaines du nord du massif et les vallées plus au moins encaissés (Tifrit) les sols alluviaux sont dominants et occupent les parties basses et planes. Ils sont quelque fois associés à des sols bruns rouges méditerranéens à texture légère ou encore des sols bruns ou des lithosols, qui les surplombent à partir des collines douces. Ces sols constituent le meilleur potentiel et acceptent une grande diversité des cultures, notamment les cultures irriguées à cause d'un drainage naturel satisfaisant, dans les vallées en l'occurrence.

5.2.3. Les sols de montagne

La plus grande partie des sols cités précédemment se retrouve en milieu montagneux. Cependant, il y a un ordonnancement naturel dans leur répartition, due encore à leur condition de développement. Sur les hauts versants quand la végétation naturelle offre une bonne couverture et de bonnes conditions pédogénétiques (cas des forêts dense au Nord) s'installent les rendzines. Une fois cette végétation naturelle dégradée la place est laissée à des rendzines dégradées.

6. Causes de dégradation des sols

La dégradation des sols est la phase qui prépare l'érosion (Benchetri, 1972). D'une façon générale elle est liée à la dégradation de la végétation naturelle. Selon (Aubert, 1951 ; Nahal, 1975), la disparition progressive du couvert végétal conduit :

- A un appauvrissement en matière organique se traduisant, d'une part, par une désorganisation de la structure et des propriétés physico-chimiques du sol et d'autre part, par un abaissement de la fertilité ;
- A une diminution de l'efficacité de la pluie dans la recharge des réserves en eau du sol ;
- A une augmentation du ruissellement qui entraîne les graines des espèces végétales loin de la zone ;
- A une mauvaise économie de l'eau du sol au cours de l'année (augmentation de l'évaporation, absence du mulch) ;

- A une érosion hydrique accrue ; La dégradation des sols qui accompagne habituellement la dégradation du couvert végétal peut être de trois types différents (Riquier, 1978 in Baumer, 1987) :

- Dégradation physique : perte de structure, encroûtement, colmatage réduction de la perméabilité, baisse de l'aération, limitation de l'enracinement ;

- Dégradation chimique : lessivage de bases et acidification, toxicité ;

- Dégradation biologique : perte de matière organique, décroissance de l'activité biologique. (Riquier, 1978 in Baumer, 1987)

1. Généralités sur la restauration écologique

Au sens strict, la restauration écologique est « le processus d'assister la régénération des écosystèmes qui ont été dégradés, endommagés ou détruits ». Il s'agit donc d'une activité intentionnelle qui initie ou accélère le rétablissement d'un écosystème antérieur par rapport à sa composition spécifique, sa structure communautaire, son fonctionnement écologique, la capacité de l'environnement physique à supporter les organismes vivants et sa connectivité avec le paysage ambiant. Ceci nécessite une bonne connaissance de l'écologie fonctionnelle et évolutive des écosystèmes ciblés, de l'histoire de la dégradation anthropique et, enfin, le choix d'un écosystème de référence pour guider la planification, la réalisation, le suivi et l'évaluation du projet de restauration.

1.1. Définition et concepts utilisés en restauration écologique

La restauration écologique est une action intentionnelle qui initie ou accélère l'autoréparation d'un écosystème en respectant sa santé, son intégrité et sa gestion durable (SER, 2004). La plupart du temps, l'écosystème qui a besoin d'être restauré a été dégradé, endommagé, transformé ou totalement détruit, résultat direct ou indirect de l'activité humaine. La Société pour la Restauration Ecologique (SER) donne une définition générale permettant une large gamme d'approches de la restauration bien qu'elle donne une importance historique au concept d'autoréparation. Au delà de cette définition généraliste, différentes notions s'appliquent aux divers processus conduisant, selon l'état de dégradation initial, à différents types d'écosystèmes restaurés. Ainsi, la restauration au sens strict peut consister selon Aronson *et al.* (1993) en une simple suppression des causes de dégradation ou la ré-application des usages traditionnels.

2. Les étapes de la restauration écologique

2.1. Planification de la restauration

Selon l'International Primer on Ecological Restoration, (2004) les plans pour les projets de restauration comprennent, au minimum, les points suivants :

- un raisonnement clair sur pourquoi la restauration est nécessaire,
- une description écologique du site désigné pour la restauration,
- une énonciation des buts et objectifs du projet de restauration,

- une désignation et une description de la référence,
- une explication sur comment la restauration proposée va s'intégrer au paysage et à ses flux d'organismes et de matériaux,
- des plans explicites, des calendriers et des budgets pour la préparation du site, les activités d'installation et de mise en route, incluant une stratégie pour faire de promptes corrections à mi-course,
- des standards de performance bien développés et explicitement établis, avec des protocoles de suivi grâce auxquels le projet peut être évalué,
- des stratégies pour une protection et un maintien à long-terme de l'écosystème restauré,
- les objectifs et les protocoles pour le suivi et l'évaluation du projet doivent être incorporé au départ.

2.2. Suivi et évaluation

Bien planifié, un projet de restauration tente clairement d'atteindre les buts fixés qui reflètent les attributs importants de l'écosystème de référence. Ces buts sont atteints en s'assignant des objectifs spécifiques. Les buts sont des idéaux et les objectifs des mesures concrètes prises pour les atteindre. Trois questions fondamentales doivent se poser concernant l'évaluation de l'écosystème restauré :

- Les objectifs ont-ils été accomplis ?
- Les buts ont-ils été atteints ?
- Les résultats seront-ils durables, au sens écologique et socio-écologique du terme ?

Les réponses à ces trois questions ne peuvent être valides que si les buts et les objectifs ont été fixés avant la réalisation des travaux du projet de restauration.

Les évaluations incluent donc celles de tous les buts et objectifs fixés qui se rapportent aux aspects culturel, économique et social. Pour cela, les techniques d'évaluation doivent inclure celles des sciences sociales. L'évaluation des buts socio-économiques est importante pour les décideurs et, par la suite, pour les responsables politiques qui autoriseront et financeront ou non les projets de restauration (S.E.R., 2004).

2.3. Les Attributs de la restauration écologique

On considère qu'un écosystème a été restauré lorsqu'il

- dispose de suffisamment de ressources biotiques et abiotiques pour continuer son développement sans assistance supplémentaire ;
- L'écosystème restauré est capable de se maintenir lui-même structurellement et fonctionnellement, de montrer une certaine résilience face aux perturbations environnementales et d'interagir avec les écosystèmes voisins via des flux biotiques et abiotiques ;
- Il contient ainsi un assemblage caractéristique d'espèces similaire à celui de l'écosystème de référence et où tous les groupes fonctionnels nécessaires à son développement et à sa stabilité sont représentés ;
- Il contient ainsi un assemblage caractéristique d'espèces similaire à celui de l'écosystème de référence et où tous les groupes fonctionnels nécessaires à son développement et à sa stabilité sont représentés (S.E.R., 2004).

3. Concept de qualité des sols

Le sol est un système écologique complexe et le lieu de multiples échanges qui régulent les processus écologiques (Gobat et al, 2003). Un dysfonctionnement partiel ou intégral du système nécessite une approche écologique qui intègre l'ensemble des processus liés à son fonctionnement. Selon O'Neill et al, (1986), le bon fonctionnement d'un écosystème passe par l'intégrité des cycles de la matière et des flux d'énergie, par sa stabilité structurale et par la capacité de résilience après un stress ou une perturbation. Le sol étant le support des écosystèmes, il est directement exposé aux agressions anthropiques et aux perturbations naturelles. L'altération de l'intégrité des sols et de ses fonctions peut alors affecter le fonctionnement de l'écosystème dans sa totalité.

L'intérêt porté par une société pour un milieu, et en particulier pour un sol, dépend fortement des usages possibles de la ressource et donc des richesses qu'elle en tirera. En ce sens, le concept de qualité des sols est une notion subjective et très dynamique. La fertilité, la productivité, la durabilité des ressources et la qualité environnementale sont les principales bases des définitions historiques de la qualité des sols. Les définitions pléthoriques ont donné lieu à de nombreux critères d'évaluation et

d'interprétation. Gros (2002) définit sur une base bibliographique la qualité d'un sol comme étant « ...sa capacité à assumer ses fonctions de productivité, à contribuer à la protection de la santé des écosystèmes et de la qualité de l'eau contre les agressions anthropiques, et à retrouver après une perturbation un fonctionnement physique, chimique et/ou biologique identique ou proche du fonctionnement initial dans un temps court à l'échelle humaine ». Plus récemment, Cécillon (2008) propose de dépasser cette vision du sol centrée sur l'objet et ces fonctions écologiques que lui confère sa position d'interface entre la lithosphère, l'hydrosphère et l'atmosphère. L'auteur suggère une autre approche plus pragmatique, centrée sur l'homme et ses besoins vis-à-vis des sols. Cette vision peut compléter idéalement une conception plus écologique de la qualité des sols au sein d'une entité régionale marquée par une longue histoire co-évolutive entre Nature et Usages.

Quelle que soit la définition conceptuelle de la qualité des sols, il apparaît évident que cette qualité dépend de multiples facteurs. Il faut distinguer ceux intrinsèques aux sols comme les facteurs chimiques, physiques et biologiques, et ceux d'origines externes comme le climat. L'évaluation de la qualité des sols peut être réalisée par de simples observations ou des mesures qualitatives très complexes (Mausbach et Tugel, 1997). Les indicateurs de la qualité des sols sont des propriétés physiques, chimiques et biologiques dont la mesure doit permettre d'appréhender les fonctions essentielles. Caractériser la qualité des sols passe par l'utilisation d'indicateurs pertinents qui intègrent leur grande variabilité spatiale et temporelle dont les propriétés intrinsèques évoluent à différentes échelles (Doran et Parkin, 1994).

Pour que les indicateurs répondent de façon optimale aux besoins de l'évaluation de la qualité des sols dans l'espace et le temps, ces auteurs proposent quatre critères de sélection :

- Les indicateurs de la qualité des sols doivent traduire les processus qui ont lieu au sein de l'écosystème
- Ils doivent également intégrer des propriétés et des processus physiques, chimiques et biologiques et servir de base à l'estimation de propriétés du sol ou de fonctions qu'il est plus difficile de mesurer directement
- Être sensibles aux variations anthropiques et naturelles sur le long terme
- Faire partie intégrante de bases de données existantes lorsque c'est possible.

3.1. Restauration de la qualité des sols

La restauration d'un sol tend vers le retour de sa qualité d'avant perturbation. Les conditions historiques sont, de ce fait, un point de départ idéal pour un plan de restauration. L'écosystème restauré ne va pas nécessairement retrouver son stade antérieur, puisque des contraintes et des conditions actuelles peuvent l'entraîner vers une trajectoire altérée. Cependant, la direction et les limites générales de cette trajectoire peuvent être établies par une combinaison de connaissances sur la structure préexistante de l'écosystème endommagé, sa composition et son fonctionnement.

Face aux divers types de dégradations notamment dans le bassin méditerranéen, il existe diverses techniques de restauration (ré-végétalisation, apport de ressources...). Ces opérations de restauration passent par la mise en œuvre de techniques de génie écologique qui sont employées en fonction du type et de l'intensité de dégradation et impliquent la manipulation de matériaux naturels, d'organismes vivants et de l'environnement physico-chimique. Ces interventions volontaires sur le milieu concernant des travaux de sol nécessitent au préalable la mise en place de mesures de protection. La nécessité de restaurer les sols dégradés devrait passer par la sensibilisation des populations à leur préservation, qui peut passer par le changement des pratiques locales ou nationales voire internationales (SER, 2004).

3.1.1. La qualité chimique des sols

Le sol est avant tout le réservoir qui stocke et redistribue les nutriments sous forme d'ions indispensables à la vie des plantes. Un sol fonctionne comme un système chimique ouvert en recevant mais aussi en fournissant ces ions. Les sources d'apport de ces ions sont multiples (atmosphériques, hydriques, pratiques agricoles). La qualité chimique d'un sol est donc contrôlée par des facteurs externes (e.g. la situation géographique, le climat, les connections avec des écosystèmes voisins) mais également par facteurs internes (l'activité microbienne, relation entre les organismes) qui régulent la disponibilité de la ressource chimique (Tessier et al, 1996). Les propriétés chimiques d'un sol conditionnent les processus biologiques qui s'y déroulent. L'altération de cette qualité chimique peut donc perturber le fonctionnement biologique d'un sol. Le fonctionnement d'un écosystème est régi par des boucles de rétroaction (ou « feedback loops ») entre la ressource organique

apportée par les plantes et les communautés microbiennes qui la minéralisent apportant ainsi les nutriments aux plantes (Bever, 2003). Ces boucles de rétroaction conditionnent la disponibilité de la ressource minérale d'un sol, elle-même régie par des mécanismes écologiques tels que la compétition, la facilitation et le mutualisme entre les communautés végétales et les communautés microbiennes (Wardle, 2002).

3.1.2. La qualité physique des sols

La qualité physique des sols est étroitement liée à la structure des sols, c'est-à-dire à la façon dont les constituants minéraux et organiques sont assemblés les uns par rapport aux autres. C'est en effet dans ces différents vides que l'eau et les gaz circulent ou sont stockés et que les êtres vivants peuvent se développer (Tessier et al, 1996). La macro-faune et les micro-organismes sont les principaux acteurs de la structuration des sols. Notamment l'action des lombrics qui déplacent, retournent, aèrent les sols et augmentent la cohésion entre particules au travers leurs déjections et les micro-organismes qui synthétisent des polysaccharides qui agglomèrent les particules entre elles. L'action des racines n'est pas à négliger à la fois en terme de protection des sols et d'aération (augmentent la porosité des sols). En effet, la stabilité de la structure, c'est-à-dire la permanence de structure sous l'effet de différents agents d'agression (pluies, vents et animaux) est un aspect très important de la qualité physique des sols. Cette structure détermine les vides nécessaires à la vie c'est-à-dire le transport des gaz, des solutés et la circulation de l'eau, ou encore leur stockage permettant aux êtres vivants de se développer. La matière organique est un véritable ciment pour la structure des sols, de même que la qualité chimique possède une réelle influence sur la stabilité structurale notamment les ions monovalents (Na) sur le complexe d'échange qui ont une forte influence négative. La structure des sols est responsable de la retenue de l'eau disponible pour les plantes. En effet, l'eau stockée dans les sols est d'autant plus grande que les pores sont de petite taille et nombreux. La quantité d'eau disponible est donc liée à la porosité des sols et à leur profondeur.

La perméabilité des sols joue également un rôle important dans la vitesse d'infiltration des eaux de pluie. Cependant en cas de fortes pluies, le ruissèlement est inévitable d'autant plus si les sols ont été récemment incendiés. Les sols ont tendance à se dessécher pendant la période estivale et se rechargent en eau à l'automne et l'hiver

jusqu'à saturation, c'est-à-dire qu'ils atteignent la capacité au champ (quantité maximale d'eau que peut retenir un sol).

3.2. Les apports de la restauration écologique

La restauration de sols dégradés via des processus naturels (et notamment via les successions écologiques, n'est possible qu'à très long terme (plusieurs décennies voire plusieurs siècles pour aboutir au redéveloppement de communautés animales et végétales complexes et diversifiées). Toutefois, cette restauration peut être accélérée par des interventions artificielles soigneusement pensées qui auront d'autant plus de succès qu'elles utilisent ou miment des processus naturels : ce travail de réflexion et d'intervention est l'essence même de la restauration écologique (Dobson et al, 1997).

La restauration écologique s'appuie sur le phénomène naturel de succession primaire qui se découpe en une suite de processus biologiques et physiques sur lesquels l'homme va pouvoir intervenir de façon ponctuelle afin d'en résoudre certaines difficultés (Bradshaw, 2000). Un exemple d'intervention humaine est le fait d'assister la colonisation des sols par les plantes via l'introduction d'espèces appropriées (espèces indigènes, espèces fixant l'azote dans le cas de sols appauvris en substances azotées ou encore espèces tolérantes aux métaux dans le cas de sols pollués).

L'une des pratiques les plus couramment utilisées pour améliorer les propriétés agronomiques des sols consiste à ajouter aux horizons de surface des composts ou d'autres amendements minéraux ou organiques souvent issus du recyclage de déchets (Larney et Angers, 2012). Cette pratique permet d'enrichir le sol en éléments minéraux et organiques et/ou d'agir sur la capacité de rétention en eau, la portance, la perméabilité ou la fertilité du sol (ADEME, 2014). Ces apports de matière organique dans des milieux « stériles » n'ayant pas encore de productivité primaire favorisent notamment l'installation des communautés pionnières d'invertébrés du sol (Hodkinson et al, 2002 ; Ingimarsdottir et al, 2014).

La majorité des opérations de restauration de sols dégradés s'appuient sur une revégétalisation des sites et se préoccupent essentiellement du développement des espèces végétales voire du retour de la macrofaune (Oiseaux, Mammifères) c'est-à-

dire de taxons emblématiques dont la présence est clairement visible (Boyer et Wratten, 2010). Or, bien que la mise en place d'une communauté végétale appropriée soit fondamentale dans le processus de restauration, un intérêt tout particulier doit également être porté à la faune du sol si l'on veut retrouver un écosystème fonctionnel et autonome (Magro et al, 2013). D'ailleurs, les différents amendements et semis pratiqués lors de la restauration de sols dégradés sont parfois complétés par l'utilisation d'invertébrés comme outils de restauration à part entière. Le rôle de la macrofaune du sol dans la restauration écologique a en effet été montré dans de nombreuses études (Frouz et al, 2007; Snyder et Hendrix., 2008; Eijsackers, 2010) . Cette pratique est utilisée pour remédier à la compaction des sols en agissant sur leur microstructure (Derouard et al, 1997;Frouz et al, 2007; Ampoorter et al, 2011), pour favoriser la formation de la litière (Frouz et al, 2007) ou encore pour améliorer la productivité et la diversité végétale (Derouard et al, 1997 ; Baker et al, 2006 ; Boyer et Wratten, 2010).

4. Généralités sur les boues

D'après ADEME (2001), les boues sont définies comme étant un mélange d'eau et de matières solides, séparées par des procédés naturels ou artificiels de divers types d'eau qui le contiennent. Elles résultent du traitement des eaux usées dans des stations d'épuration urbaines ; des fosses septiques domestiques, commerciales ou urbaines ; des stations d'épuration industrielles ; des usines de filtration ou de traitement de l'eau potable.

Les eaux usées sont collectées puis acheminées vers les stations d'épuration où elles sont traitées. En fin de traitement, à la sortie de la station, l'eau épurée est rejetée vers le milieu naturel et il reste des sous-produits désignés sous le terme de boues résiduaires (Werther et Ogada, 1999). Ces boues représentent avant tout une matière première composée d'eau, de différents éléments composés de matière organique, d'éléments fertilisants (N, P, K...), d'éléments traces métalliques (ETM), d'éléments traces organiques (ETO) et d'agents pathogènes (Bousselhaj, 1996 cité par Amir , 2005).

4.1 Composition des boues résiduaires

La composition exacte des boues varie en fonction de l'origine des eaux usées, de la période de l'année et du type de traitement et de conditionnement pratiqué dans la station d'épuration (Jarde et al, 2003 ; Singh et al, 2004). D'une façon générale, la matière solide de ces résidus contient à la fois des éléments naturels valorisables (matière organique, des éléments fertilisants et amendements), des composés toxiques (contaminants chimiques inorganiques et organiques).

4.2 Traitement des boues et leur devenir

4.2.1. Traitement des boues

En vue de leur valorisation ou de leur élimination, les boues résiduelles sont collectées puis traitées en fonction de leur destination finale. A leur sortie, les boues se présentent au départ sous forme liquide et avec une forte charge en matière organique hautement fermentescible. Ces deux caractéristiques sont gênantes quelle que soit la destination des boues et imposent la mise en place d'une filière de traitement, c'est-à-dire une suite organisée de procédés qui agissent de façon complémentaire (Robert et al, 1994). Ces traitements doivent répondre à au moins l'un des objectifs suivants :

- réduction de leur teneur en eau est ceci dans le but de réduire leur volume et d'éviter la putréfaction de la matière organique facilement décomposable ;
- stabilisation de la matière organique en diminuant sa fermentescibilité pour réduire ou supprimer les mauvaises odeurs ;
- Hygiénisation si nécessaire en détruisent les micros organismes pathogènes.

4.2.2. Valorisation des boues

La nature de la matière organique des boues d'épuration fait qu'elle est facilement minéralisée par les micro-organismes du sol et produit peu d'humus. Ainsi, les boues représentent un apport de matière fertilisante très bon marché en comparaison avec les engrais chimiques. Elles peuvent être valorisées comme matières résiduelles fertilisantes (MRF) et suppléer une partie de l'apport d'engrais minéraux nécessaire à des cultures économiquement importantes (blé, maïs, ...) tout en agissant favorablement sur les propriétés du sol (ADEME, 1996). En effet, des études de la

valeur fertilisante ont démontré que l'application de boues résiduaires urbaines s'est traduite par une production importante d'azote minéral (Mench et al, 1989) et une augmentation de la teneur de formes organiques et minérales du phosphore (Brossard et al, 1989).

5. Production des boues en Algérie

En Algérie, selon l'ONA (2013) environ 732 million de m³ de boue d'épuration sont produite chaque année à raison d'environ 539 tonnes par jour sur les 150 stations d'épuration en exploitation. Ces boues sont destinées à subir des traitements qui ont pour objectif de réduire le volume de boue et de les valoriser par une réutilisation à des fins agricoles, permettent ainsi d'enrichir les sols sans recourir à des engrais chimiques, ou encore de valoriser leur potentiel énergétique sous forme de biogaz.

6. Essais de restauration par des boues dans la wilaya de Saida

Afin de préserver l'environnement, divers processus de traitement des rejets d'eaux usées sont utilisés. L'utilisation de boues d'épuration en milieu semi-aride, caractérisées par un climat contraignant, la pression anthropozoogène et l'érosion, qui revêt une importance croissante, constitue une solution pour la restauration des terres forestières dégradées. Les résultats des travaux de l'ingestion de composts dans le sol de la forêt de Aioun Branise (Ouled Brahim, Saida) ont montré un effet significatif des boues d'épuration sur les caractéristiques physiques et chimiques du sol qui ont été traitées. Cet effet est dû à l'augmentation de la capacité de rétention, en ammonium, phosphore inorganique, azote total, le carbone et les composés organiques (Borsali et al, 2014).

1- Présentation de la zone d'étude :

La zone d'étude fait partie de la commune d'Ouled Khaled, située au Nord- Ouest de la wilaya de Saïda. Elle relève de la daïra de Sidi Boubkeur. (Figure III-1)

Le type de climat dans notre zone d'étude est méditerranéen appartenant à l'étage bioclimatique semi-aride à un hiver frais. Selon les données climatiques obtenues de la station météorologique de Rebahia (Saida) en 2018, la zone a reçus des précipitations de l'ordre 454,53/an. On y distingue deux périodes contrastées, une période humide qui s'étale sur 8 mois d'Octobre jusqu'a Mai et la période sèche et chaude qui s'étale sur 4 mois de Juin jusqu'a Septembre. Les précipitations estivales sont souvent des pluies torrentielles et les températures présentent des amplitudes importantes. Les mois de Janvier et Février sont les mois les plus froids durant toute l'année (10.6°C et 8.9 °C) et le mois de Juillet et Août sont les mois les plus chauds (30°C et 28.9°C). Le vent est de direction dominante Nord et Sud avec une présence du vent chaud (sirocco) pendant la période estivale qui peut accélérer le phénomène de l'érosion éolienne dans les zones dépourvus de couvert végétal.

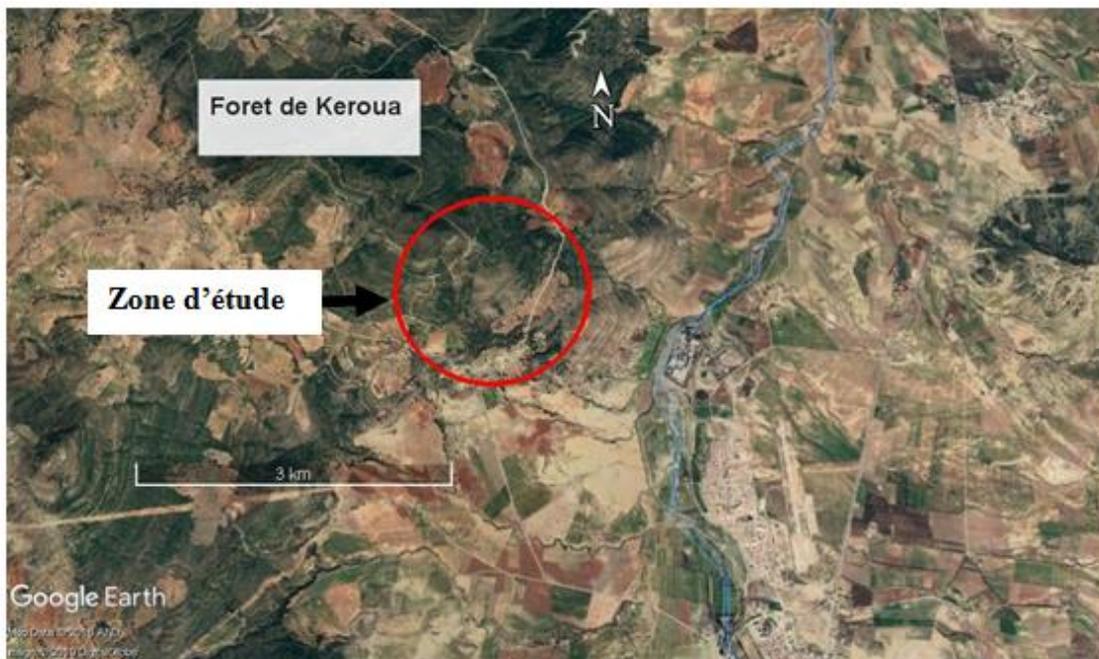


Figure III-1 : Présentation de la zone d'étude.

2. Origine, choix et caractéristiques des composts utilisés

Le compost utilisé dans cette étude est un compost de boues de la station d'épuration de la wilaya de Saida, il est issues du traitement des eaux usées urbaine d'Ain El-Hadjer (Wilaya de Saida).

Ce compost a été analysé par un spectrophotomètre à fluorescence X dans la cimenterie d'Al-Hassasna. Le tableau ci-dessous présente quelques caractéristiques chimiques de son contenues.

Tableau III-1 : Quelques caractéristiques chimiques du compost utilisé

| Caractéristiques | Pourcentage (%) |
|--------------------------------|-----------------|
| Na ₂ O | 0,15 |
| MgO | 2,31 |
| Al ₂ O ₃ | 5,44 |
| SiO ₂ | 17,54 |
| SO ₃ | 2,92 |
| Cl | 0,09 |
| K ₂ O | 1,13 |
| CaO | 12,00 |
| Fe ₂ O ₃ | 2,38 |

3. Mise en place de l'expérimentation *in situ* par l'apport de compost

Dans la zone étude en a installé 5 placettes expérimentales, chaque parcelle d'étude couvre une surface de 1 m² **Figure III-2** : et délimitée par un cadre métallique fixé sur une surface plane, la distance entre chaque deux placettes est au minimum de 2 mètres. En Mars 2018, le compost séché criblés à 40 mm a été apportés en mulch (dépôt de surface) à la dose équivalente de 23 tonnes par hectare de matières sèches (soit 2.3 kg de compost équivalent sec par placette de 1 m²). Un grillage métallique a finalement été fixé sur chaque placette pour empêcher le retournement des sols par les sangliers.

Les placettes utilisées comme témoins, sont des zones non amendées par le compost et se localise dans des endroits loin de la zone où la restauration a été mise en place



Figure III-2 : Illustration photographique d'une placette expérimentale d'apport *in situ* de compost

4. Prélèvement du sol

En Mars 2019, les échantillons de sol ont été prélevés de chaque placette restaurée (n=5) et non restaurée (n=5), sur l'horizon 0-10 cm après l'enlèvement total de la litière . Cela conduit donc au total à 10 échantillons composites pour les 10 parcelles avec un poids total de 30 kg. Ces échantillons de sols ont été tamisés à 2 mm puis conditionnés dans des sachets plastiques avant de procéder aux analyses.

5. Analyses physico-chimiques des sols

Afin de déterminer les principales caractéristiques physico-chimiques des sols, nous avons procédé aux analyses suivantes :

5.1. Les analyses physiques

5.1.2. La texture

La connaissance de la texture permet d'indiquer les tendances du sol quant à ses qualités physiques, c'est ainsi que la texture a une influence primordiale sur le régime hydrique des sols. On estime cette texture à l'aide d'un essai rapide (test de boudin) à

effectuer sur le terrain pour déterminer la texture du sol. Prenez une poignée de sol humide et pressez-la pour en faire une boule. Lancez la boule en l'air à 50 cm environ et rattrapez-la. Si la boule se désagrège, le sol est pauvre et contient trop de sable. Si la boule reste formée, le sol est probablement bon et contient suffisamment d'argile (FAO, 1994)

5.1.1. Humidité

L'humidité du sol est déterminée par pesée d'une certaine quantité de sol avant et après passage à l'étuve à 105°C. La perte de poids par le sol représente le poids d'eau évaporée pendant le séchage.

A partir de la méthode de Mathieu, (1998) chaque échantillon de sol tamisée à 2 mm (100 g) sera placé dans un bécher numéroté (soit P1 le poids d'un bécher vide et P2 le poids d'un bécher + terre frais).

-Porter le bécher et son contenu dans une étuve à dissociation dont température devra être maintenue à 105°C.

-laisser sécher durant 24 heures.

-Peser de nouveau chaque bécher (P3 le poids d'un bécher + terre à 105°C.)

La détermination de l'humidité au champ effectuée selon la formule suivante :

$$\text{Eau \%} = \frac{(p2-p3)}{(p3-p1)} \times 100$$



Figure III-3: Mesure de l'humidité.

5.1.3. Capacité de rétention

La capacité de rétention de l'eau varie dans les sols beaucoup en fonction de leur porosité. Cette humidité des sols se mesure généralement en pourcentage de l'eau contenue dans le sol par rapport au volume total de terre (Ramade, 2003).

Mode opératoire :

- On pèse un cylindre en fond contient des pores (p_1)
- On met le sol jusqu'à la moitié de cylindre et pose dans un plateau.
- Verser l'eau distillée dans le plateau à la moitié de cylindre et en laisse 02 heures jusqu'à la saturation, peser (p_2).
- Transporter tout le contenu dans un bécher et placer le dans un étuve à 105.
- Laisser le cylindre séché 12 heures

$$\text{Capacité de rétention} = \frac{[(p_2 - p_1)(p_3 - p_1)]}{(p_3 - p_1) \times 100}$$



Figure III-4 : Essai de la capacité de rétention.

5.1.4. Perméabilité

Perméabilité d'un sol est mesurée suivant la hauteur d'eau évaluée par centimètre qui s'infiltré par unité de temps, dans le sol. (Mathieu et Pieltain, 1998).

Mode opératoire :

- On met le sol mélangé de chaque station dans une éprouvettes jusqu'au trait de 100 ml.

- On complète par l'eau distillé jusqu'à 200 ml.
- On laisse reposer 12 heures et après on mesure la hauteur (h eau) de chaque éprouvette.
- On détermine la perméabilité par la formule suivante : $K_{perméabilité} = 0,857 \times h_{eau}$ (mm/h).

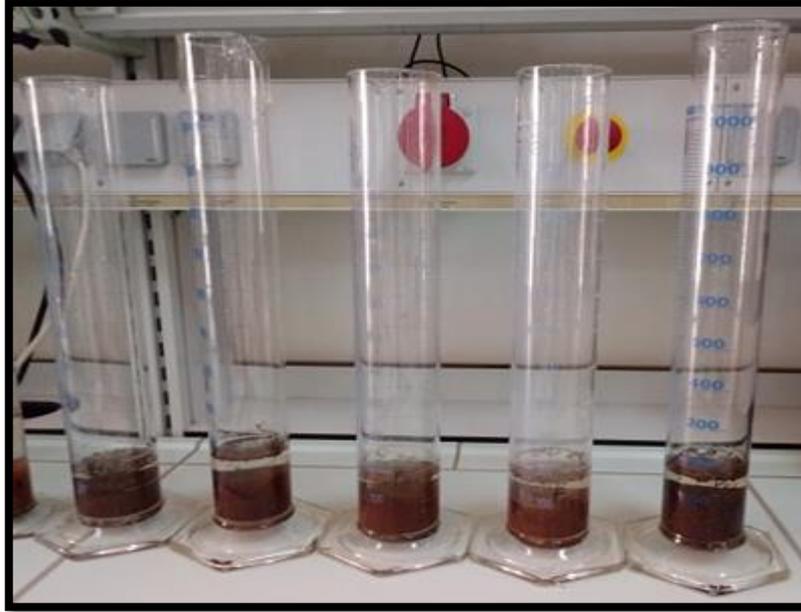


Figure III-5 : Mesure de la perméabilité

5.1.5. La densité apparente, densité réelle et Porosité

D'après Calvet (2003), la porosité est une grandeur physique qui exprime le rapport entre deux volumes, le volume occupé par des pores dans un milieu donné et le volume totale de ce milieu. La porosité peut être déterminée à partir de la densité réelle et la densité apparente d'un sol.

5.1.5.1. Détermination de densité apparente

On met dans un bécher 100g de sol frais.

-Séché ce sol à 105°C dans une étuve pendant 24 heures. Soit P1 : bécher vide, P3 : bécher + sol séché à 105°C.

-P1, P3 sont exprimés en g.

La valeur de la densité apparente est exprimée par la formule suivante :

$$D_a = \frac{(p_3 - p_1)}{250}$$

5.1.5.2. Détermination de densité réelle

Mode opératoire :

- La densité réelle sera obtenue de la manière suivante :
 - Utiliser un liquide organique tel que le benzène, déterminée la densité « d » du liquide utilisé à la température du laboratoire.
 - Remplir de benzène, le pycnomètre jusqu' au trait de jauge et peser p1.
 - Peser avec précision 10 g (p) de terre fine séchée à l'étuve à 105°C.
 - Versés délicatement dans le pycnomètre qui doit être parfaitement propre.
 - Remplir 75 ml environ le pycnomètre avec du benzène.
 - Porter le pycnomètre dans un dessiccateur, lorsque le dégagement d'air devient nul, sortir le pycnomètre du dessiccateur.
 - Remplir le benzène le pycnomètre jusqu'au trait de jauge, Dès que le niveau du benzène ne varie plus et reste à la hauteur de jauge, porter le pycnomètre sur une balance de précision, le poids obtenu p2
- v : correspond au poids du volume de benzène, égale à celui de la prise d'essai de terre

On déduit le volume V occupé par le poids « p »de terre.

$$V = \frac{(p1-p)-p2}{d} \quad \text{Le rapport } Dr = \frac{p}{v} \text{ (densité réelle).}$$

5.1.5.3. Détermination de la porosité totale :

A partir de Da et Dr on obtient alors la porosité totale égale a : $(Dr - Da)/Dr \times 100$.

5.2. Les analyses chimiques

5.2.1. pH et pH_{KCL}

L'acidité des sols a été mesurée par un pH-mètre à électrode de verre combinée trempant dans une suspension aqueuse du sol dont le rapport sol/eau est 1/2.5 après 1 heure d'agitation puis décantation. Deux mesures d'acidité ont été faites: l'acidité actuelle (pH_{eau}) et l'acidité potentielle (pH_{KCl}). Cette dernière se fait par l'ajout d'une quantité de KCL

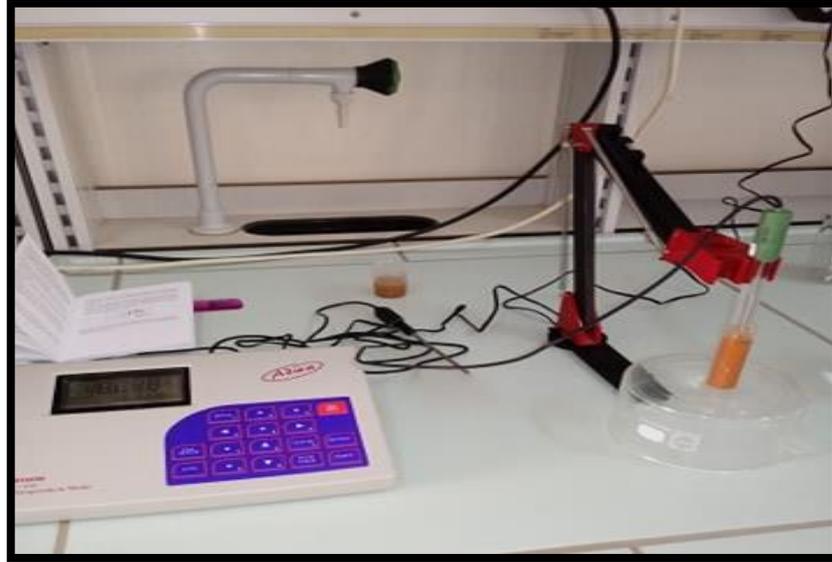


Figure III-6 : Mesure de pH et pH_{KCL}

5.2.2. Conductivité électrique (CE)

La conductivité électrique des sols est mesurée à l'aide d'un conductimètre sur l'extrait de sol dont le rapport eau/sol = 1/5. Cette mesure physique, exprimée en (m/s), nous donne une idée sur la concentration des électrolytes dans les solutions des sols d'une part et du degré de salinisation des sols d'autre part (Aubert, 1978).

5.2.3. Matière organique

Il s'agit de la matière carbonée provenant de la décomposition et de l'évolution des êtres vivants (végétaux, macro et microfaune). Cette matière composée de carbone, d'oxygène, d'azote et d'éléments minéraux, évolue sans cesse (Ctifl, 2012)

-Méthode :

- On prend les 05 échantillons de chaque station.
 - On pèse 50 g de sol sec à 105 °C de chaque station (p2).
 - On pèse la capsule en vide (p1).
 - On met le sol (sol + capsule) (p3) dans le four à moufle à 600 °C pendant 15 heures
 - On pèse le sol (sol + capsule) (p4) après les retire a four a mofle (figure16).
 - On détermine le taux de matière organique suivant la formule :
- % de matière organique = E – F.

5.2.4. Dosage du calcaire total CaCO_3

Le dosage du CaCO_3 total est réalisé par la méthode volumétrique, en décomposant les carbonates de calcium du sol par l'acide chlorhydrique ($\text{HCl}_{1/2}$) et mesurer le volume du CO_2 dégagé à l'aide du calcimètre de Bernard.

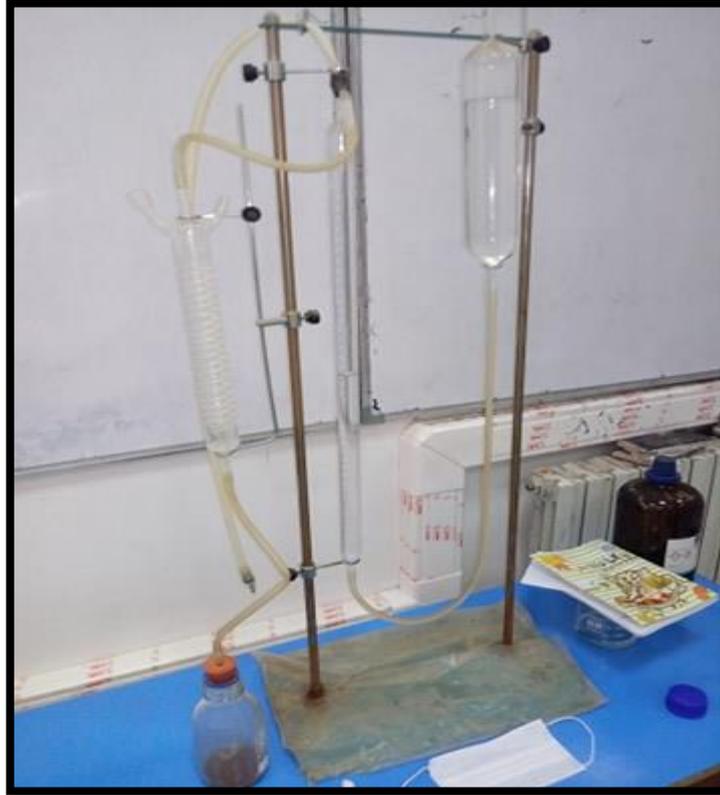


Figure III-7: Dosage du calcaire total (CaCO_3)

6. Analyses statistiques

Les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel MINITAB 17. Le test-t de student est utilisé pour comparer les moyennes. L'homogénéité des variances ainsi que la normalité des différents jeux de données ont été vérifiées préalablement avec l'utilisation des tests paramétriques.

1. Résultats

Une année après les apports des composts sur le terrain pâturé, seules 5 variables physicochimiques sur 11 sont significativement modifiées.

1.1 Effet du compost sur les propriétés chimiques du sol

Les résultats de cette étude ont montré que le compost a significativement augmenté l'ensemble de pH_{KCL} , conductivité électrique, calcaire totale et la teneur en matière organique du sol. (Figure IV-1)

Pour le pH_{KCL} , en a enregistré une hausse dans la zone restaurée par rapport à la zone non restaurée de l'ordre de 2.88%. De même, la conductivité électrique a augmenté dans la zone amendée par le compost que celle témoin, respectivement (0.20 ; 0.14 m/s), mais ces valeurs restent toujours dans l'intervalle non salé. Les taux du calcaire total est plus importantes dans les placettes restaurées (11.90% ; Modérément calcaire) que celle non restaurées (3.81% ; Peu calcaire). Pour la teneur en matière organique du sol, en a enregistré un taux plus élevé dans les zones amendées par le compost par rapport à leurs témoins, respectivement (9.54, 3.43%). Alors que pour le pH_{EAU} , l'analyse statistique a montré que le compost n'a pas d'effet significatif sur ce paramètre.

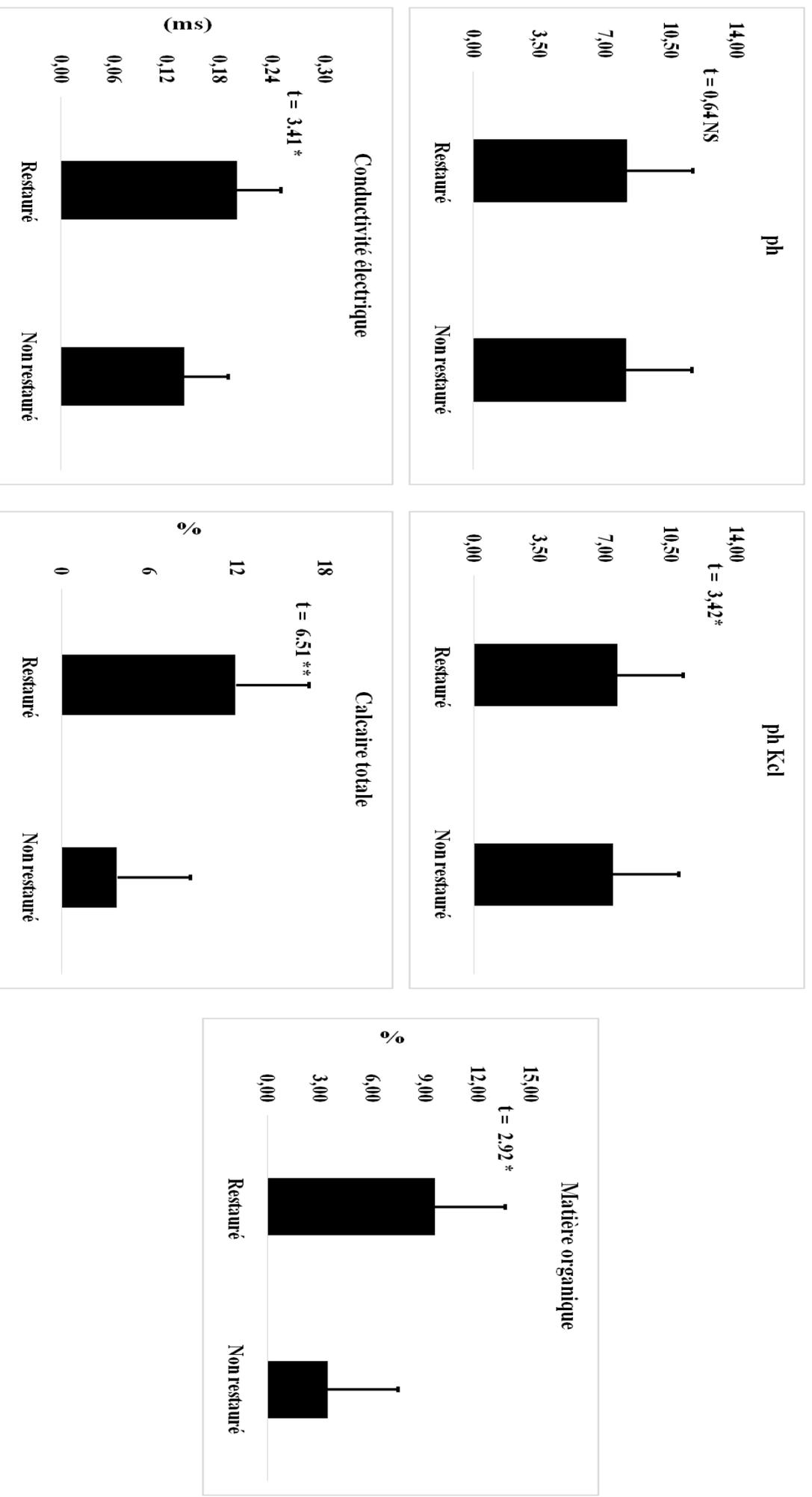


Figure IV-1: Représentation graphiques des propriétés chimiques après restauration (*: $P < 0,05$; **: $P < 0,01$; ***: $P < 0,001$; NS : non significatif).

1.2. Effet de composts sur les propriétés physiques du sol

Nos résultats montrent que l'apport de compost sur les sols pâturés n'a pas d'effet significatif sur ces propriétés sauf sa perméabilité, ou en a constaté une diminution dans la zone restaurée par rapport à la zone non restaurée, respectivement (1,64 ; 3,85mm/h). Pour la densité apparente et la densité réelle, nos résultats montrent une diminution de l'ordre de 10% et 7% (respectivement) dans les sols restaurés par rapport à sont témoins. La porosité totale qui représente le rapport entre les deux propriétés précédentes, ces valeurs sont presque les mêmes. Concernant l'humidité du sol, les valeurs enregistrées montrent qu'elle a augmenté dans la zone restaurée (8.60%) en comparaisant avec la zone non restaurée (7.80%). Aussi la capacité de rétention des sols amendés par le compost a été augmentée par rapport aux placettes non amendées de l'ordre de 12%. (Tableau IV-1)

Tableau IV-1: Propriétés physiques des sols restauré et leurs témoins.

| | Propriétés | Restauré | Non restauré | Signification |
|-----------|---|----------|--------------|---------------|
| Physiques | Densité apparente (g.cm ⁻³) | 1,28 | 1,42 | NS |
| | Densité réelle (g.cm ⁻³) | 2,27 | 2,44 | NS |
| | Porosité totale (%) | 42,20 | 41,55 | NS |
| | Humidité (%) | 8,60 | 7,80 | NS |
| | Capacité de rétention (%) | 59,90 | 53,17 | NS |
| | Perméabilité (mm/h) | 2,64 | 2,74 | ** |

Ce tableau consigne les valeurs moyenne avec son seuil de significativité (*: P<0,05 ; ** : P<0,01 ; *** : P<0,001 ; NS : non significatif). Les lettres minuscules identiques indiquent l'absence de différence significative entre les moyennes.

2. Discussion

Les résultats obtenus de cette étude ont montré que la restauration écologique par l'apport de compost a affecté significativement le pH_{KCL} des sols mise sous pâturage. L'augmentation de ce paramètre dans la zone restaurée corrobore avec les résultats obtenus par D'Hose et al (2014), qui montrent que l'amendement des sols dégradés par le compost augmente son pH_{KCL} . Pour le pH_{EAU} , les données semblent contradictoires. Nos résultats montrent que ce paramètre a connu une hausse mais qu'elle n'est pas significative. Cela est soutenu par les résultats de Morera et al. (2002), et qui a noté que suite à l'épandage des boues sur les sols légèrement alcalins, le pH n'a connus aucun changement. Aussi (Agegnehu et al, 2016) ont constaté que le pH du sol n'a pas été influencé de manière constante et significative par l'ajout de compost. A l'inverse d'autres travaux comme D'Hose et al, (2014) ; Steel et al (2012) Sarwar et al, (2008) ont montré que l'amendement des sols par le compost augmente son pH.

L'augmentation ou la diminution du pH_{KCL} et pH_{EAU} des sols restaurés par l'apport de compost et selon (Perreault, 2016) montre que l'effet des boues sur la réaction d'un sol amendé dépend de sa capacité tampon, c'est-à-dire sa capacité à limiter les changements de pH par sa rétention des cations échangeables (capacité d'échange cationique).

Concernant la conductivité électrique, on a enregistré une augmentation significative dans la zone restaurée par rapport à la zone non restaurée. Selon Yilmaz et Alagöz, 2010, l'amendement des sols méditerranéens par les boues résiduelles a augmenté la conductivité électrique. Aussi Morugán et al, 2011 ont enregistré une hausse significative de la conductivité électrique des sols méditerranéennes après l'incorporation des résidus des eaux usées à des sols dégradés. L'ajout de compost à des sols perturbés par l'action humaine (pratiques agricoles, déboisement, ...etc) a fait l'objet de plusieurs études tels que D'Hose et al (2014) ; Casado-Vela et al, 2007; Yilmaz et Alagöz, 2010, et qui ont montré que cette action a augmenté la conductivité électrique de ces sols. Cela a été considéré comme un résultat de l'addition de sels solubles lors de l'incorporation de l'amendement (Hueso et al, 2014). Pour le calcaire total, notre expérience de restauration écologique par l'apport de composte a provoqué une augmentation de la teneur de $CaCO_3$ dans le sol de l'ordre de 11.90%. Cette augmentation est logique car les analyses chimiques de boues utilisées ont montré que l'oxyde de calcium (CaO) forme 12% de sa composition total. Cela indique que le calcaire total augmente dans les sols peu calcaire et devient

modérément calcaire lorsque les matériaux organiques appliqués au sol sont riche en CaO.

L'augmentation de la conductivité électrique et le calcaire total dans les placettes restaurées par rapport aux placettes non restaurées peuvent être étroitement liées avec la composition chimique de compost. Cette relation a été étudiée par Sarwar et al, (2008), ils ont remarqué que la conductivité électrique des sols des régions arides et semi-arides caractérisés par la présence de CaCO_3 dépendra de la quantité de matières organiques appliquée, la décomposition de cette matière peut convertir CaCO_3 qui est toujours présent dans ces sols en CaHCO_3 ou même à Na_2CO qui sont des formes plus solubles, par conséquent, la conductivité électrique du sol va augmentée. Donc, dans notre cas, la hausse enregistrée au niveau de la conductivité électrique est due à la forte teneur du compost en CaO.

Après une année de restauration écologique par l'apport de compost, la teneur en matière organique du sol a été augmentée de façon significative dans les placettes restaurées par rapport aux non restaurées. Ces résultats sont confirmés par plusieurs auteurs. Selon Borsali et Zadi, (2014), la restauration des sols forestiers des pinèdes par le compost a augmenté significativement le carbone organique dans ces sols. La restauration des pâtures par l'apport de compost a amélioré selon Aggelides et Londra, (2000) ; Ros et al, 2006) le statut du carbone organique dans le sol de façon marquée.

Pour le domaine agricole, plusieurs travaux ont été effectués sur l'effet de compost soit sur la qualité physicochimiques des sols, soit sur le rendement des cultures. Dans l'ensemble, les résultats de (Yurievna et al, 2003 ; Sarwar, et al, 2008, Agegnehu, et al, 2016) ont montré que l'ajout du compost aux sols agricoles augmente sa teneur en matière organique et améliore sa productivité.

La forte teneur en matière organique enregistré dans les placettes restaurées est due essentiellement à la composition du compost qui est très riche en matière organique.

Les résultats de la détermination de la texture à l'aide d'un essai rapide sur le terrain (test de boudin) ont montré que tous les échantillons de sols (restauré et non restauré)

présentent une texture sableuse. Dans ce type de sol, les espaces lacunaires sont très importants. Cette caractéristique est due à la forme grossière et irrégulière du grain de sable et leur disposition peu serrée.

La restauration écologique par l'apport de compost a diminuée significativement la perméabilité du sol de plus de la moitié. Ces résultats corrobore avec celle obtenus par Borsali et Zadi(2014) qui ont montré que l'apport des boues sur des sols forestiers dégradés de l'étage bioclimatique semi aride a réduit significativement la perméabilité de ces sols. Aussi Benbrahim et al, (2003), ont constaté que l'épandage de compost dans des plantations de pin maritime a diminué la perméabilité du sol en surface. D'après Ouarabi et Ramdani (2017), l'apport de matière organique (origine animale) diminue de façon remarquable la perméabilité des sols sableux.

Les sols sableux sont très filtrant, ce qui est en soit très mauvais sur le plan physique. Donc l'apport de compost a enrichi le sol en matière organique qui améliore ces propriétés physiques et indirectement, elle réduit les espaces lacunaires du sol sableux qui se traduit par une diminution de l'écoulement de l'eau dans le sol.

Concernant l'humidité et la capacité de rétention, en a constaté une légère augmentation de ces deux propriétés dans les sols restaurés par rapport a son témoin, mais cette différence n'est pas significative sur le plan statistique. D'après Pandey et Shukla (2006), les effets de l'amendement organique par le compost sur le mouvement de l'eau dans un sol sableux a augmenté sa teneur en humidité dans la zone racinaire (20 cm de haut). Aussi, Agegnehu et al, (2016) ajoute que la restauration des sols tropicaux dégradés par le compost a amélioré la teneur en eau de ces sols. Pour la capacité de rétention, plusieurs études tel que Aggelides et Londra (2000) ; Cogger (2005) ; Guénon (2010) et Habib et Zohra (2014) montrent que la restauration écologique des sols dégradés par l'apport de compost maintient et augmente la capacité au champ.

Cette augmentation de l'humidité et de la capacité de rétention en eau résulte de l'augmentation de la teneur en matière organique du sol résultant de l'application du compost.

Une diminution a été enregistrée pour la densité apparente et la densité réelle, par contre la porosité totale qui représente le rapport entre ces deux propriétés a connu une légère augmentation. Signalant que ces modifications ne sont pas significatives

statistiquement, mais elles convergent vers une modification positive qui résulte de l'amendement de compost ce qui était déjà montré par Aggelides et Londra (2000) ; Cogger (2005) ; Mylavarapu et Zinati (2009).

L'effet de la restauration écologique sur les propriétés physico-chimiques des sols pâturés par l'amendement de la matière organique exogène dépend de la quantité ajoutée par hectare et la maturité du compost utilisé dans cette application.

Conclusion générale :

Le sol est une ressource non renouvelable essentielle à l'activité humaine et à la survie des écosystèmes. Sa préservation nécessite une étude et un suivi basés notamment sur des indicateurs de sa qualité.

Cette ressource naturelle, dans les zones semi-arides, est très limitée. Elle est soumise depuis fort longtemps, à une forte et persistante dégradation (action climatique, anthropiques, etc.), où les conséquences sont souvent répercutés sur ces propriétés physico-chimiques.

L'objectif principal de ce mémoire consiste à mettre en évidence l'effet de l'apport de compost sur les propriétés physico-chimiques après une année de sa mise en place sur des sols pâturés.

Les principaux résultats obtenus ont montré que, l'apport de compost sur des sols mise sous pâturage a augmenté significativement son pH_{KCL} . Cette variation dépend de la réaction du sol avec l'amendement de compost, et de sa capacité tampon.

Concernant la conductivité électrique, en a enregistré une augmentation significative dans la zone restaurée par rapport a la zone non restaurée. Cette hausse est le résultat de l'addition de sels solubles lors de l'incorporation de l'amendement par le compost.

Pour le calcaire total, notre expérience de restauration écologique par l'apport de composte a provoquer une augmentation de la teneur de CaCO_3 dans le sol de l'ordre de 11.90%. Cette augmentation est logique car les analyses chimiques de boues utilisées ont montré que l'oxyde de calcium (CaO) forme 12% de sa composition total.

Après une année de restauration écologique par l'apport de compost, la teneur en matière organique du sol a été augmentée de façon significative dans les placettes restaurées par rapport aux non restaurées. La forte teneur en matière organique enregistré est due essentiellement à la composition du compost qui est très riche en matière organique. Alors que le pour le pH_{EAU} , nos résultats montrent que ce paramètre a connu une hausse mais qu'elle n'est pas significative.

L'apport de compost a diminuée significativement la perméabilité du sol de plus de la moitié. Ces apports ont enrichi le sol en matière organique qui améliore ces propriétés physiques et indirectement, elle réduit les espaces lacunaires du sol sableux qui se traduit par une diminution de l'écoulement de l'eau dans le sol.

Concernant l'humidité et la capacité de rétention, on a constaté une légère augmentation de ces deux propriétés dans les sols restaurés par rapport à son témoin, mais cette différence n'est pas significative sur le plan statistique.

Une diminution a été enregistrée pour la densité apparente et la densité réelle, par contre la porosité totale qui représente le rapport entre ces deux propriétés a connu une légère augmentation. Signalant que ces modifications ne sont pas significatives statistiquement, mais qu'elles convergent vers une modification positive qui résulte de l'amendement du compost.