

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mouloud MAMMARI de Tizi-Ouzou

Faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques

Thèse de

## **DOCTORAT ès SCIENCES**

Spécialité : **Sciences Biologiques**

Présentée par

**LIMANE Abdelkrim**

Intitulé du sujet :

Réponses architecturales racinaires et stratégies d'absorption hydrominérale chez *Pistacia atlantica* en fonction d'un gradient d'aridité croissante : cas d'un transect Nord-Sud en Algérie.

Jury de soutenance :

Noms et Prénoms	Grades	Lieux d'exercices	Qualité
Meddour Rachid	Professeur	UMMTO	Président
Smail-Saadoun Noria	Professeur	UMMTO	Rapporteuse
Kadi-Hanifi Halima	Professeur	USTHB	Examinatrice
Belhadj Safia	Professeur	U. Djelfa	Examinatrice
Riba Amar	Professeur	U. Boumerdès	Examineur
Boudiaf-Nait Kaci Malika	MCA	UMMTO	Examinatrice

Soutenue publiquement le 22/03/2018.

## *Remerciements et gratitude*

A mon père (*Tahar*), que l'omniscient lui réserve le sort des justes.

A ma mère (*Allam Djouher*), ma complice affectueuse et bienveillante, qui n'a pas hésité à rejoindre le maquis à côté de ses frères et sœurs d'arme pour qu'entre autres, l'accès à l'éducation nous soient acquis.

A ma chère moitié (*Larbi Rachida*), qui a supporté toutes mes absences et m'a encouragé même au détriment de son confort et de sa propre carrière pour concrétiser ce rêve.

A mes sœurs : *Ourida, Naima, Wahiba, Louisa* et *Rosa*

A mes frères : *Achour, Said* et *Samir*.

A mes enfants : *Elyès, Mahdi* et *Leila*.

A mes belles sœurs et mes beaux-frères et leurs enfants.

A mes neveux et nièces.

« *Souvent le voyage est plus important que la destination* »

En effet, c'est grâce à cette aventure que j'ai pu connaître des gens plein de générosité, de gentillesse, de probité, en somme d'Humanité. La première personne qui me vient à l'esprit est sans conteste Mme *Smail Noria* (née *Saadoun*). Les mots me manquent quant à décrire ce que j'ai appris à ses côtés, je dirai simplement que j'ai eu beaucoup de chance, ce qui résumera tout.

A tous ceux qui m'ont soutenu et aidé tous le long de ce périple, je les citerai par ordre alphabétique :

- *Allilèche M'neouar*
- *Andrew Chua* (Australian national university).
- *Arab Hakim*
- *Belekbir-Boukais Amel* (Ingénieure de laboratoire, UMMTO)
- *Bensidhoum Messaoud* (Maître Assistant, UMMTO)
- *Christiane Charest* (Professor. Department of Biology, University of Ottawa, Canada).
- *Dalpe Yolande* (Adjunct Professor. Agriculture et agroalimentaire Canada. Centre de recherches de l'Est sur les céréales et les oléagineux)
- *Djouahra Idris* (Maître Assistant en statistiques, USTHB)
- *Issolah Samir* (Ingénieur en Informatique)

- *José Herrera* (Ph.D. Provost and Vice President for Academic Affairs Mercy College. New York City Academic Affairs)
- *Kadi Djamila* (Doctorante)
- *Kebsi Said* (Ingénieur agronome)
- *Kissoum - Hamdini Karima* (Ingénieure de laboratoire, UMMTO))
- La conservation de Béchar (*Messaoudène Kamel* et ses collègues)
- La conservation de Laghouat.
- La conservation de Msila (*Chikouche Abdelatif* et ses collègues)
- *Larbi Maurad*
- *Larbi Zahir*
- *Marc Brundrett* (Professor. Senior Ecologist. Parks and Wildlife. Western Australia.)
- *Messaoudène Mohand* (Directeur de l'INRF de Tizi Ouzou) (qu'Allah lui accorde Sa miséricorde)
- *Boudiaf-Nait Kaci Malika* (Maitre de Conférence. UMMTO)
- *Thomas Gradziel* (Professor. UC Davis. College of Biological science. Department of Plant science. USA.)
- Que ceux que j'ai oublié de citer veuillent bien me le pardonner.

Aux honorables membres du jury :

Pr. Meddour Rachid,

Pr. Kadi-Hanifi Halima,

Pr. Belhadj Safia,

Pr. Riba Amar,

et Dr. Boudiaf-Nait Kaci Malika,

qui m'ont fait l'honneur d'examiner et améliorer ce travail, veuillez accepter ma  
profonde reconnaissance.

*« Nul animal sur terre, nul oiseau volant de ses ailes, qui ne soit  
comme vous des communautés. »*

# Tables des matières

**Remerciements**

**Liste des figures**

**Liste des tableaux**

**Abréviations**

	Page
<b>Introduction générale et objectifs</b> .....	2
<b>Chapitre I : Description de l'espèce</b>	
1. Noms vernaculaires et taxonomie .....	6
2. La plante.....	6
3. Système racinaire.....	7
4. Feuilles.....	8
5. Fleurs.....	9
6. Fruits.....	11
7. Exigences édapho-climatiques et chorologie inhérente.....	13
8. Intérêts de l'espèce.....	16
<b>Chapitre II : Caractéristiques des zones d'étude et échantillonnage</b>	
1. Choix des stations.....	21
2. Présentation des zones d'étude.....	22
2.1. Station de Sidi Naamane (wilaya de Médéa) .....	22
2.1.1. Situation géographique .....	22
2.1.2. Cadre géologique .....	23
2.1.3. Hydrographie .....	23
2.1.4. Phytosociologie .....	23
2.2. Station d'el Mergueb (wilaya de M'sila) .....	25
2.2.1. Cadre géographique .....	25
2.2.2. Cadre géologique .....	26
2.2.3. Géomorphologique.....	28
2.2.4. Hydrographie .....	29
2.2.5. Sols .....	30
2.2.6. Composition floristique .....	30

2.3. Station de Lekhneg (wilaya de Laghouat) .....	31
2.3.1. Situation géographique.....	31
2.3.2. Géologie .....	32
2.3.3. Caractéristiques hydrogéologique.....	33
2.3.4. Phytosociologie .....	33
2.4. Station de Béni Ounif (wilaya de Béchar) .....	35
2.4.1. Situation géographique .....	35
2.4.2. Géomorphologie .....	35
2.4.3. Hydrographie .....	37
2.4.4. Pédologie.....	37
2.4.5. Flore saharienne .....	38
3. Synthèse climatique .....	39
3.1. Méthodologie .....	39
3.1.1 Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gausson (1953) ....	39
3.1.2. Quotient pluviothermique et climagramme d'Emberger (1955)...	39
3.1.3. Indice d'aridité (UNEP, 1992).....	41
3.1.4. Zonation écoclimatique selon la méthode de Le Houérou (1995).....	41
3.2. Résultats .....	42
4. Echantillonnage .....	47
4.1. Caractéristiques des individus échantillonnés et estimation de leurs âges .....	47
4.2. Echantillonnage des sols et des racines .....	48
<b>Chapitre III : Adaptations des architectures racinaires du pistachier de l'Atlas en fonction du sol sous-jacent</b>	
1. Introduction .....	52
2. Synthèse bibliographique .....	52
2.1. Influence de l'aridité sur les caractéristiques des sols .....	52
2.1.1. Facteurs climatiques et physiques.....	53
2.1.2. Caractéristiques pédogénétiques .....	54
2.1.3. Sols sous pistachiers de l'Atlas .....	58
2.2. Influence de l'aridité sur les architectures racinaires .....	60
2.3. Interactions sol / racines en milieux arides.....	65
3. Matériels et méthodes.....	67

3.1. Méthode d'échantillonnage .....	67
3.2. Caractéristiques générales des individus échantillonnés .....	68
3.3. Méthode pour la détermination des classes des circonférences (classes d'âges relatifs) dans chaque population .....	68
3.4. Profils et mesures racinaires .....	69
3.5. Echantillonnage des sols et analyses physiques et chimiques.....	71
3.5.1. Granulométrie .....	72
3.5.2. Capacité de rétention en eau.....	72
3.5.3. pH eau .....	72
3.5.4. Taux de calcaire total .....	73
3.5.5. Taux de carbone organique .....	73
3.6. Analyses statistiques .....	73
4. Résultats et discussions .....	74
<b>Volet I. Réponses architecturales racinaires de quatre populations de pistachier de l'Atlas à des variations de propriétés physiques et chimiques de leurs sols sous-jacents respectifs</b>	
<b>1. Station de Sidi Naamane (Médéa) .....</b>	<b>74</b>
1.1. Caractéristiques des individus échantillonnés .....	74
1.2. Estimation des classes d'âges relatifs des individus échantillonnés à Sidi Naamane .....	74
1.3. Caractéristiques pédologiques des sols sous pistachiers de l'Atlas échantillonnés .....	75
1.3.1. Résultats .....	75
1.3.1.1. Texture .....	75
1.3.1.2. Capacité de rétention en eau.....	77
1.3.1.3. pH .....	77
1.3.1.4. Taux de calcaire total.....	78
1.3.1.5. Taux de matière organique .....	79
1.3.2. Corrélations statistiques des variables pédologiques .....	80
1.3.3. Discussion .....	81
1.4. Caractéristiques racinaires .....	83
1.4.1. Résultats .....	83
1.4.2. Corrélations statistiques des variables racinaires .....	85
1.4.3. Conclusions .....	86

1.5. Interaction sol / système racinaire .....	87
1.5.1. Résultats .....	87
1.5.2. Discussion .....	89
<b>2. Daya d'el-Mergueb (M'sila) .....</b>	<b>90</b>
2.1. Caractéristiques des individus échantillonnés .....	90
2.2. Estimation des classes d'âges relatifs des individus échantillonnés à el Mergueb .....	91
2.3. Caractéristiques pédologiques des sols sous pistachiers de l'Atlas échantillonnés .....	91
2.3.1. Résultats .....	91
2.3.1.1. Texture.....	92
2.3.1.2. Capacité de rétention en eau.....	92
2.3.1.3. pH .....	95
2.3.1.4. Taux de calcaire total .....	95
2.3.1.5. Taux de matière organique .....	95
2.3.2. Corrélations statistiques des variables pédologiques .....	96
2.3.3. Discussion .....	98
2.4. Caractéristiques racinaires .....	100
2.4.1. Résultats .....	100
2.4.2. Corrélations statistiques des variables racinaires .....	102
2.5. Interactions sol / système racinaire.....	104
2.5.1. Résultats .....	104
2.5.2. Discussion .....	106
<b>3. Daya de Lekhneg (Laghouat) .....</b>	<b>108</b>
3.1. Caractéristiques des individus échantillonnés .....	108
3.2. Estimation des classes d'âges relatifs des individus échantillonnés ...	108
3.3. Caractéristiques pédologiques des sols sous pistachiers de l'Atlas échantillonnés.....	109
3.3.1. Résultats.....	109
3.3.1.1. Texture .....	109
3.3.1.2. Capacité de rétention en eau.....	111
3.3.1.3. pH .....	112
3.3.1.4. Taux de calcaire total.....	113
3.3.1.5. Taux de matière organique.....	113

3.3.2. Corrélations statistiques des variables pédologiques .....	114
3.3.3. Discussion .....	115
3.4. Caractéristiques racinaires .....	119
3.4.1. Résultats .....	119
3.4.2. Discussion .....	121
3.4.3. Corrélations statistiques des variables racinaires .....	122
3.4.4. Conclusions .....	123
3.5. Interaction sol / système racinaire .....	123
3.5.1. Résultats .....	123
3.5.2. Discussion .....	125
<b>4. Station de Béni Ounif (Béchar) .....</b>	<b>127</b>
4.1. Caractéristiques des individus échantillonnés.....	127
4.2. Estimation des classes d'âges relatifs des individus échantillonnés....	128
4.3. Caractéristiques pédologiques.....	128
4.3.1. Résultats .....	128
4.3.1.1. Texture .....	129
4.3.1.2. Capacité de rétention en eau .....	129
4.3.1.3. pH .....	131
4.3.1.4. Taux de calcaire total .....	132
4.3.1.5. Taux de matière organique .....	132
4.3.2. Corrélations statistiques des variables pédologiques .....	133
4.3.3. Discussion .....	134
4.4. Caractéristiques racinaires .....	136
4.4.1. Résultats .....	136
4.4.2. Corrélations statistiques des variables racinaires .....	139
4.4.3. Discussion .....	139
4.5. Interaction sol / système racinaire .....	140
4.5.1. Résultats .....	140
4.5.2. Discussion .....	142
 <b>Volet II : Adaptation architecturale racinaire du pistachier de l'Atlas selon un gradient d'aridité climatique et édaphique croissante : cas d'un transect nord-sud en Algérie</b>	
1. Introduction .....	148
2. Matériels et méthodes .....	149

3. Résultats .....	151
3.1. Estimation des classes d'âges relatifs des individus échantillonnés....	151
3.2. Caractéristiques climatiques et quantité d'eau potentiellement disponible pour le stockage en profondeur .....	152
3.3. Sélection des variables pédologiques les plus corrélées avec la capacité de rétention en eau des sols.....	154
3.4. Evolution des variables pédologiques le long du gradient d'aridité croissante.....	154
3.5. Caractéristiques racinaires des populations échantillonnées le long du gradient.....	156
3.5.1. Sélection des variables racinaires « statistiquement » significatives .....	158
3.5.2. Evolution selon le gradient d'aridité croissante des variables racinaires les plus significatives .....	159
3.6. Corrélations entre les variables climatiques et les variables pédologiques des stations échantillonnées .....	160
3.7. Corrélations entre les variables pédologiques et les variables racinaires des individus échantillonnés dans les quatre populations .....	163
4. Discussion .....	166
<b>Chapitre IV : Inventaire des champignons arbusculaires et endophytes racinaires associés au pistachier de l'Atlas le long d'un gradient d'aridité croissante en Algérie</b>	
1. Introduction .....	177
2. Synthèse bibliographique.....	178
2.1. Racine primaire.....	178
2.2. Champignons mycorhiziens.....	178
2.2.1. Caractères généraux.....	178
2.2.2. Taxonomie des Gloméromycota.....	179
2.2.3. Cycle de développement des VAM .....	181
2.2.4. Bénéfices des symbioses mycorhiziennes.....	182
2.2.5. Identification des VAM .....	183
3. Mycoendophytes .....	187
3.1. Caractères généraux .....	187
3.2. Taxonomie des endophytes racinaires .....	189

3.3. Fonctions et rôles des endophytes .....	189
3.3.1. Rôle des endophytes dans la croissance de l'hôte et l'acquisition des nutriments .....	190
3.3.2. Rôle des endophytes dans la résistance aux pathogènes et insectes nuisibles .....	191
a. Protection contre les pathogènes .....	191
b. Protection contre les insectes nuisibles et les herbivores .....	192
4. Matériel et méthodes .....	192
4.1. Echantillonnage des racines .....	192
4.2. Blanchiment des racines .....	193
4.3. Coloration des racines .....	193
4.4. Observation au microscope photonique .....	194
5. Résultats et discussion .....	194
<b>Volet I : Approche intra-populationnelle</b> .....	194
<b>A. La population de Sidi-Naamane (Médéa)</b> .....	194
1. Résultats .....	194
1.1. Endomycorhizes à arbuscules (VAM) .....	194
1.2. Endophytes septés .....	197
2. Discussion .....	198
<b>B. La population de la <i>daya</i> d'el Mergueb (M'sila)</b> .....	199
1. Résultats .....	199
1.1. Endomycorhizes à arbuscules (VAM) .....	199
1.2. Endophytes septés .....	202
2. Discussion .....	204
<b>C. La population de la <i>daya</i> de Lekhneg (Laghouat)</b> .....	204
1. Résultats .....	204
1.1. Endomycorhizes à arbuscules (VAM) .....	204
1.2. Les endophytes septés .....	206
2. Discussion .....	208
<b>D. La population de Béni Ounif (Béchar)</b> .....	211
1. Résultats .....	211
1.1. Endomycorhizes à arbuscules (VAM) .....	211
1.2. Les endophytes septés .....	212
2. Discussion .....	214

<b>Volet II : Approche inter-populationnelle</b> .....	215
<b>Chapitre V : Conclusions et perspectives</b> .....	220
<b>Références bibliographiques</b> .....	225
<b>Annexes</b>	

## Liste des figures

### Chapitre I

- Fig. 1 : Pistachier de l'Atlas à Béni Ounif (Béchar, mars 2010)
- Fig. 2 : Système racinaire généralisé du pistachier de l'Atlas (Béni Ounif, mars 2010)
- Fig. 3 : Feuilles du pistachier de l'Atlas à Béni Ounif (Mars 2010).
- Fig. 4 : Inflorescences mâles du pistachier de l'Atlas (daya d'el Mergueb, mars 2008)
- Fig. 5 : Fleur mâle isolée (x40) du pistachier de l'Atlas (d1 : anthère, d2 : sépale, d3 : bractée) (*In* Yaqoobi et al., 2009).
- Fig. 6 : Fleur femelle isolée (x50) du pistachier de l'Atlas, (d1 : stigmate ; d2 : style ; d3 : ovaire ; d4 : sépale) (*In* Yaqoobi et al., 2009).
- Fig. 7 : Fruits en maturation du pistachier de l'Atlas (Sidi Naamane, avril 2010)
- Fig. 8 : Fruits mûrs (x20) du pistachier de l'Atlas (el Mergueb, mars 2008)
- Fig. 9: Feuilles, fleurs (1. Mâle ; 6. Femelle ; 2. Ovaire et 3. Le même ovaire coupé pour voir l'ovule) et fruits (4. Fruit mûr ouvert pour montrer la graine ; 5. Coupe transversale de l'embryon). (Modifié d'après Monjauze (1980) et <http://delta-intkey.com/angio/images/pista465.gif>.)
- Fig. 10 : Carte de distribution de *Pistacia atlantica* Desf. dans le monde (modifié d'après Alyaif (1979) ; Browicz (1988) et Khaldi (comm.pers. *In* Zohary (1996) ; Belhadj (2007)).
- Fig. 11 : répartition de *Pistacia atlantica* Desf. au Nord algéro-tunisien (Monjauze, 1968).
- Fig. 12: répartition du pistachier de l'Atlas (*Pistacia atlantica* Desf.) en Algérie.
- Fig. 13: nids d'oiseaux sur le pistachier de l'Atlas dans la daya d'el Mergueb (Mars 2008)
- Fig. 14: écorce de pistachier de l'Atlas exsudant de la résine (flèches)

### Chapitre II

- Fig. 15: localisation géographique des quatre wilayas abritant nos stations : Médéa (1), M'sila (2), Laghouat (3) et Béchar (4).
- Fig. 16: localisation de la commune de Sidi Naamane au sein de la wilaya de Médéa
- Fig. 17: image satellite d'une partie de la population de pistachier de l'Atlas de la station de Sidi Naamane (Flèches) (Source : Google earth, 2015).
- Fig. 18 : vues de l'intérieur de la population de pistachier de l'Atlas de Sidi Naamane, montrant un erme à *Asphodelus microcarpum* et *Drimia numidica* sur Talweg à pente moyenne. (Avril 2010).
- Fig. 19: localisation de la commune de Ain el Hadjal (abritant la daya d'el Mergueb) au sein de la wilaya de M'sila (Source : Wikimedia.org, 2015).
- Fig. 20: image satellite d'une partie de la daya d'el Mergueb abritant une partie de la population de pistachier de l'Atlas (flèches) (Source : Google earth, 2015).

Fig. 21: pelouse à faible dénivelé de la daya d'el Mergueb (Mars 2008)

Fig. 22 : une nebkha avec ses jeunes pistachiers de l'Atlas (flèches) entre les touffes du jujubier dans la daya d'el Mergueb (Mars 2008).

Fig. 23: localisation de la commune de Lekhneg au sein de la wilaya de Laghouat

Fig. 24: image satellite de la population de pistachier de l'Atlas échantillonnée dans la daya de Lekhneg (flèche) (Source : Google earth, 2015).

Fig. 25: vues de l'intérieur de la daya à *Pistacia atlantica* et *Ziziphus lotus* de Lekhneg (Avril 2011)

Fig. 26: localisation de la commune de Béni Ounif au sein de la wilaya de Béchar

Fig. 27: image satellite d'une partie de la population de pistachier de l'Atlas (flèche) suivant le réseau hydrographique de la station de Béni Ounif (Source : Google earth, 2015).

Fig. 28: vues de l'intérieur de la population de pistachier de l'Atlas de la station de Béni Ounif montrant une pseudo-steppe à *Tamarix gallica* et *Hammada scoparia* sur lit d'oued faiblement encaissé. (Mars 2010)

Fig. 29: diagrammes ombrothermique de Bagnouls et Gausson (1953) des quatre stations.

Fig. 30: situation des stations dans le climagramme d'Emberger.

Fig. 31 : courbes de tendances et coefficients de corrélations respectifs des variables climatiques utilisées.

### Chapitre III

Fig. 32 : morphologie et végétation des dayas du stade naissant au stade adulte (Taibi et al., 1999).

Fig. 33: systèmes racinaires intensifs : a: *Stipa tenacissima* ; b: *Artemisia herba-alba*. (Pouget, 1980a).

Fig. 34: système racinaire à extension horizontale (microdune avec *Aristida pungens*) (Pouget, 1980a).

Fig. 35 : système racinaire à extension verticale d'*Armeria plantagine* (Lemée, 1978).

Fig. 36: système racinaire à extension mixte d'*Arthrophytum scoparium* (A) et (B) *Helianthemum hirtum* ssp. *ruficomum* (Pouget, 1980a).

Fig. 37: les trois architectures racinaires chez les ligneux (selon Hellmers et al., 1955 ; Hairiah et Van Noordwijk, 1986).

Fig. 38 : profil racinaire unilatéral (qui découvre un côté uniquement du système racinaire).

Fig. 39 : moyennes des constituants granulométriques et des capacités de rétention de chaque sol sous pistachier échantillonné à la station de Sidi-Naamane.

Fig. 40 : moyennes des pH des sols sous pistachier de l'Atlas échantillonnés à Sidi Naamane.

Fig. 41 : moyennes des teneurs en calcaire total des sols sous pistachier de l'Atlas échantillonnés à Sidi Naamane.

Fig. 42 : moyennes des teneurs en matière organique des sols sous pistachier de l'Atlas échantillonnés à Sidi Naamane.

Fig. 43 : évolutions selon la profondeur, des variables pédologiques des sols échantillonnés à Sidi Naamane.

Fig. 44: excavation unilatérale des systèmes racinaires des sujets échantillonnés de la population de Sidi Naamane (Avril, 2010).

Fig. 45 : ACP confrontant les variables pédologiques et racinaires des individus échantillonnés à Sidi Naamane.

Fig. 46 : moyennes des constituants granulométriques et des capacités de rétention de chaque sol sous pistachier de l'Atlas échantillonné à la daya d'el-Mergueb.

Fig. 47 : moyennes des pH de chaque sol sous pistachier de l'Atlas échantillonné de la daya d'el-Mergueb.

Fig. 48: moyennes des teneurs en calcaire total de chaque sol sous pistachier de l'Atlas échantillonné de la daya d'el-Mergueb.

Fig. 49 : moyennes des teneurs en matière organique de chaque sol sous pistachier de l'Atlas échantillonné de la daya d'el-Mergueb.

Fig. 50 : évolution selon la profondeur, des variables pédologiques des sols sous pistachier de l'Atlas de la daya d'el Mergueb.

Fig. 51 : profils racinaires des sujets échantillonnés dans la daya d'el-Mergueb (Mars 2008).

Fig. 52 : ACP appliquée aux variables racinaires et celles pédologiques de la daya d'el-Mergueb.

Fig. 53 : moyennes des constituants granulométriques et des capacités de rétention des sols sous pistachier de l'Atlas échantillonné dans la daya de Lekhneg.

Fig. 54 : moyennes des pH des sols échantillonnés dans la daya de Lekhneg.

Fig. 55 : moyennes des taux de calcaire total des sols échantillonnés dans la daya de Lekhneg.

Fig. 56 : moyennes des teneurs en matière organique des sols échantillonnés dans la daya de Lekhneg.

Fig. 57 : évolution selon la profondeur des variables pédologiques des sols sous pistachiers de l'Atlas de la daya de Lekhneg.

Fig. 58 : profils racinaires des pistachiers de l'Atlas échantillonnés dans la daya de Lekhneg (Avril 2011).

Fig. 59 : ACP montrant les contributions des variables pédologiques et racinaires des individus échantillonnés dans la daya de Lekhneg.

Fig. 60 : moyennes des constituants granulométriques et des capacités de rétention de chaque sol sous pistachier de l'Atlas échantillonné à la station de Béni Ounif.

Fig. 61 : moyennes des pH des sols sous pistachier de l'Atlas de la station de Béni Ounif.

Fig. 62 : moyennes des taux de calcaire total des sols échantillonnés à la station de Béni Ounif.

Fig. 63: moyennes des taux de matière organique des sols échantillonnés à la station de Béni Ounif.

Fig. 64 : évolution selon la profondeur des variables pédologiques des sols sous pistachiers de l'Atlas de la station de Béni Ounif.

Fig. 65 : systèmes racinaires des sujets échantillonnés dans la station de Béni Ounif (Mars 2010).

Fig. 66: ACP montrant la contribution des individus et des variables pédologiques et racinaires de la population de Béni Ounif.

Fig. 66b : vue du lit d'oued où végètent une partie de la population de pistachier de l'Atlas échantillonnée (Mars 2010).

Fig. 67: nombreuses anastomoses racinaires chez les pistachiers de l'Atlas de la population de Béni Ounif

Fig. 68 : quantités d'eau potentiellement disponible en profondeur ( $W_{sur}$ ) et déficit hydrique ( $W_{def}$ ) selon le transect nord-sud.

Fig. 68: Evolution des variables pédologiques le long du gradient d'aridité croissante.

Fig. 69 : courbes des tendances et coefficients de corrélations ( $R^2$ ) des variables racinaires le long du transect nord-sud.

Fig. 70: ACP montrant les contributions des variables climatiques et celles pédologiques des quatre stations échantillonnées.

Fig. 71: ACP montrant les contributions des variables pédologiques et racinaires des individus des quatre populations de pistachier de l'Atlas.

Fig. 72 : pistachier de l'Atlas dans la daya de Lekhneg temporairement « noyée » (Avril 2011)

Fig. 73: Nebkhas à *Ziziphus lotus* et jeune pistachier de l'Atlas (flèche) dans la daya de Lekhneg (Avril 2011).

Fig. 74: Lit d'oued à Béni Ounif et un pistachier de l'Atlas déraciné (mais toujours vivant !) (Mars 2010).

## Chapitre IV

Fig.75 : coupes transversales d'une racine primaire d'Eudicot ( $\times 25$  et  $\times 200$ ) (Speranza et Calzoni, 2005).

Fig.76 : composants principaux des mycorhizes à arbuscules (Brundrett et *al.*, 1996).

Fig. 77: arbre phylogénétique des glomérromycètes (Redecker et *al.*, 2013).

Fig. 78: cycle de développement des VAM (Akiyama, 2007).

Fig. 79: caractéristiques du schéma de colonisation des racines qui peuvent être utilisées pour l'identification des genres appartenant aux VAM (Abbott,1982 et McGee, 1989, *In* Brundrett et *al.*, 1996).

Fig. 80: deux types principaux de colonisation des VAM (Peterson et *al.*, 2004)

Fig. 81: microsclérotos (têtes de flèches), hyphes marrons septés de surface (1) et ceux internes (2) d'un endophyte foncé septé (Dark Septate Endophyte : DSE) (Peterson et *al.*, 2004).

Fig. 82: microsclérotos (1) et hyphes septés (2) d'un DSE. (Source : <http://botany.thismia.com/2010/02/28/dark-septate-endophytes/>)

Fig.83 : ramifications en « Y » des hyphes intercellulaires (flèches) caractéristiques du genre *Glomus* ( $\times 400$ ).

Fig.84 : hyphes faiblement colorés (1) et vésicules rectangulaires à paroi fine (2) remplies de gouttelettes lipidiques (3) du genre *Acaulospora* ( $\times 400$ ).

Fig.85 : vésicules auxiliaires externes pigmentées en marron (1) et hyphe externe (2) du genre *Scutellospora* ( $\times 400$ ).

Fig.86 : hyphes intercellulaires (flèches) caractéristiques du type « *Arum* » ( $\times 100$ ).

Fig.87 : coils intracellulaires (flèches) caractéristiques du type « *Paris* » ( $\times 400$ ).

Fig. 88 : hyphes marron septés de surface (1) et interne (2) de DSE ( $\times 400$ ).

Fig.89 : microsclérote (1) et hyphe (2) de DSE dans le cortex racinaire ( $\times 400$ ).

Fig. 90 : vésicules ovales intercellulaires (flèches) caractéristiques du genre *Glomus* ( $\times 100$ ).

Fig. 91: hyphes (1) et vésicules (2) remplies de gouttelettes lipidiques (3) caractéristiques du genre *Acaulospora* ( $\times 400$ ).

Fig. 92 : arbuscules (1) à troncs épais (2) caractéristiques du genre *Scutellospora* ( $\times 400$ ).

Fig. 93 : hyphes intercellulaires (flèches) caractéristiques du type « *Arum* » ( $\times 100$ ).

Fig. 94 : hyphes en pelotons (coils) intracellulaires (flèches) caractéristiques du type « *Paris* » ( $\times 400$ ).

Fig. 95 : hyphes marron septé de surface (1) et interne (2) et microsclérotos (3) de DSE ( $\times 100$ )

Fig. 96 : microsclérotos de DSE en maturation (flèches) ( $\times 100$ ).

Fig. 97 : structures marron en « pelote de laine » (flèches) non identifiées à la surface de la racine (×400).

Fig. 98 : vésicules ovales intercellulaires (flèches) caractéristiques du genre *Glomus* (×100).

Fig. 99 : arbuscules denses (flèches) typique de *Glomus versiforme* (×400).

Fig. 100 : vésicules caractéristiques du genre *Acaulospora* (1) et hyphes intercellulaires du type « *Arum* » (2) (×100).

Fig. 101 : hyphe septé (1) et microsclérotos matures pigmentées en marron (2) de DSE (×100).

Fig. 102 : microsclérotos matures pigmentées en marron (flèches) occupant le milieu intracellulaire de certaines cellules du cortex racinaire (×400).

Fig. 103 : microsclérotos immatures (flèches) de DSE occupant le milieu intracellulaire de certaines cellules du cortex racinaire (×400).

Fig. 104 : ramifications en « Y » des hyphes intercellulaires (1) et vésicule ovale intercellulaire (2) du genre *Glomus* (×400).

Fig. 105 : hyphes intercellulaires (flèches) du type « *Arum* » (×100).

Fig. 106 : hyphes marron septés (flèches) de DSE à la surface de la racine (×100).

Fig. 107 : hyphes marron septés (1) de DSE parcourant la surface de la racine hérissée de poils absorbants (2) (×100).

Fig. 108 : microsclérotos en maturation (flèches) dans les cellules du cortex racinaire (×400).

Fig. 109 : microsclérotos matures (1) et en voie de maturation (2) dans les cellules du cortex racinaire (×100).

## **Annexes**

### **Annexe 5**

Fig. 110 : évolution des principales variables édaphiques et racinaires et leurs courbes de tendances respectives, le long du transect nord-sud choisis.

### **Annexe 6**

Fig. 111 : synoptique montrant les principaux résultats (en moyennes) de l'étude de la variabilité de l'architecture racinaire du pistachier de l'Atlas (*Pistacia atlantica* Desf.) et des symbiotes racinaires qui lui sont associés le long d'un gradient d'aridité climatique et édaphique croissante en Algérie.



## **Liste des tableaux**

### **Chapitre II**

Tableau 1 : températures et pluviométries des stations étudiées (ONM, Alger).

Tableau 2 : indices d'aridité (IA) et zonations écoclimatiques correspondantes (UNEP, 1992).

Tableau 3 : zonalités écoclimatiques proposées par Le Houérou (1995).

Tableau 4 : moyennes mensuelles du Potentiel d'Evapotranspiration (ETP) de chaque station (calculées par le biais du logiciel Cropwat (FAO, 2009)).

Tableau 5 : synthèse des principales caractéristiques climatiques des stations étudiées.

Tableau 6 : données et formules utilisées pour la zonation écoclimatique des stations selon la méthode de Le Houérou (1995).

Tableau 7: résultats des tests ANOVA appliqués aux populations pour vérifier la significativité des différences des hauteurs et des circonférences des troncs des arbres échantillonnés.

### **Chapitre III**

Tableau 7b : Textures des différents sols sous pistachiers de l'Atlas précédemment étudiés selon un gradient d'aridité croissant (flèche) en Algérie.

Tableau 8 : Intervalles des pH des différents sols sous pistachiers de l'Atlas précédemment étudiés selon un gradient d'aridité croissant (flèche) en Algérie.

Tableau 9 : Intervalles des teneurs en calcaire total des différents sols sous pistachiers de l'Atlas précédemment étudiés selon un gradient d'aridité croissant (flèche) en Algérie.

Tableau 10 : Intervalles des teneurs en matière organique des différents sols sous pistachiers de l'Atlas précédemment étudiés selon un gradient d'aridité croissant (flèche) en Algérie.

Tableau 11 : caractéristiques des individus échantillonnés à Sidi Naamane.

Tableau 12: classes des circonférences des troncs et âges relatifs des individus échantillonnés à Sidi Naamane.

Tableau 13 : caractéristiques physiques et chimiques des sols sous pistachier de l'Atlas de la station de Sidi Naamane.

Tableau 14 : moyennes des caractéristiques physiques et chimiques des quatre niveaux de sols sous pistachier de l'Atlas de la population de Sidi-Naamane.

Tableau 15 : corrélations entre les variables pédologiques des échantillons de sols sous pistachier de l'Atlas de la station de Sidi Naamane (a).

Tableau 16: corrélations entre les variables pédologiques des échantillons de sols sous pistachier de l'Atlas de la station de Sidi Naamane (b).

Tableau 16b: résultats des mesures racinaires des individus échantillonnés à Sidi Naamane

Tableau 17 : résultats des mesures racinaires (%) des individus échantillonnés à Sidi Naamane

Tableau 18 : test de corrélation de Pearson appliqué aux variables racinaires des pistachiers de l'Atlas de la station de Sidi Naamane.

Tableau 19: test de corrélation de Pearson appliqué aux variables pédologiques et racinaires de la station de Sidi Naamane.

Tableau 19b : caractéristiques des pistachiers de l'Atlas échantillonnés dans la daya d'el-Mergueb.

Tableau 20 : classes des circonférences des troncs et âges relatifs des individus échantillonnés dans la daya d'el-Mergueb.

Tableau 21 : caractéristiques physiques et chimiques des sols sous pistachier de la daya d'el-Mergueb

Tableau 22 : moyennes des résultats d'analyses pédologiques des sols sous pistachier de la population d'el-Mergueb

Tableau 23 : corrélations entre les variables pédologiques des sols sous pistachiers de la daya d'el-Mergueb (a).

Tableau 24 : corrélations entre les variables pédologiques des sols sous pistachiers de la daya d'el-Mergueb (b).

Tableau 25: résultats des mesures racinaires des individus échantillonnés à el Mergueb

Tableau 26 : résultats (en %) des mesures racinaires des individus échantillonnés à el-Mergueb.

Tableau 27 : corrélations entre les variables racinaires des pistachiers de l'Atlas de la daya d'el-Mergueb.

Tableau 28 : corrélations entre les variables pédologiques et celles racinaires de la population d'el- Mergueb.

Tableau 28b: principales caractéristiques des individus échantillonnés dans la daya de Lekhneg.

Tableau 29 : classes des circonférences des troncs et âges relatifs des individus échantillonnés dans la daya de Lekhneg.

Tableau 30 : caractéristiques physiques et chimiques des sols sous pistachiers de l'Atlas de la population de Lekhneg.

Tableau 31: moyennes des variables pédologiques des sols sous pistachiers de la population de Lekhneg.

Tableau 32 : corrélations entre les variables pédologiques des sols sous pistachier de l'Atlas de la daya de Lekhneg (a).

Tableau 33: corrélations entre les variables pédologiques des sols sous pistachier de l'Atlas de la daya de Lekhneg (b).

Tableau 34 : résultats des mesures racinaires des individus échantillonnés à Lekhneg.

Tableau 35 : mesures racinaires (en %) des individus échantillonnés dans la daya de Lekhneg.

Tableau 36 : résultats des tests de corrélations de Pearson confrontant les variables racinaires de la daya de Lekhneg.

Tableau 37 : résultats des tests de corrélations de Pearson confrontant les variables pédologiques et racinaires de la daya de Lekhneg.

Tableau 38 : caractéristiques des individus échantillonnés à la station de Béni Ounif.

Tableau 39: classes des circonférences des troncs et âges relatifs des individus échantillonnés dans la station de Béni Ounif

Tableau 40 : caractéristiques physiques et chimiques des sols sous pistachier de l'Atlas de la station de Béni Ounif.

Tableau 41 : moyennes des caractéristiques physiques et chimiques des sols de la station de Béni Ounif.

Tableau 42: tableau des corrélations entre les variables pédologiques des sols sous pistachiers de l'Atlas de la station de Béni Ounif (a).

Tableau 43 : tableau des corrélations entre les variables pédologiques des sols sous pistachiers de la station de Béni Ounif (b).

Tableau 44: résultats des mesures racinaires des individus échantillonnés à Béni Ounif.

Tableau 45 : mesures racinaires brutes et en % des pistachiers de l'Atlas échantillonnés à Béni Ounif.

Tableau 46 : résultats du test de corrélation de Pearson appliqué aux variables racinaires.

Tableau 47 : corrélations entre les variables pédologiques et les variables racinaires des pistachiers de l'Atlas de la station de Béni Ounif.

Tableau 48: classes des circonférences des troncs des individus échantillonnés dans les quatre populations.

Tableau 49 : eau potentiellement stockable en profondeur ( $W_{sur}$ ) et déficit hydrique ( $W_{def}$ ) dans les sols de chaque station.

Tableau 50 : test de corrélation confrontant les variables pédologiques des quatre stations

Tableau 51 : nombre de racines échantillonnées par station et fréquence de chaque type racinaire.

Tableau 52 : types, dimensions, caractéristiques et fréquences des racines des individus échantillonnés dans les quatre populations.

Tableau 53 : résultats des tests ANOVA appliqués aux mesures brutes des caractéristiques racinaires des quatre populations.

Tableau 54 : résultats du test de corrélation de Pearson confrontant les variables climatiques et les variables pédologiques des quatre stations.

Tableau 55 : corrélation entre les variables pédologiques et celles racinaires des quatre stations échantillonnées.

#### **Chapitre IV**

Tableau 56 : descriptif des principales caractéristiques morphologiques des champignons appartenant à cinq genres de VAM lors de la colonisation des racines (Brundrett et *al.*, 1996).

Tableau 57: critères symbiotiques pour caractériser les classes de champignons endophytes (Rodriguez et *al.*, 2009).

Tableau 58 : genres, types morphologiques des VAM et endophytes racinaires observés dans les quatre populations étudiées.

#### **Annexes**

Annexe 1 : normes d'appréciation de la réaction du sol (pH) (Baize, 2000).

Annexe 2 : normes d'appréciation du calcaire total du sol (Baize, 2000)

Annexe 3 : normes d'appréciation de la matière organique (Soltner, 1982).

Annexe 4 : Tableau 59 : moyennes (en %) des variables racinaires et édaphiques des quatre populations du transect nord-sud choisis.

## Abréviations

- NRS : nombre de ramifications des racines superficielles
- NRP : nombre de racines profondes
- NRT : nombre total des racines
- LTRS : longueur totale des racines superficielles
- LTRP : longueur totale des racines profondes
- LTR : longueur totale racinaire
- CMRS : circonférence moyenne des racines superficielles
- CMRP : circonférence moyenne des racines profondes
- CMR : circonférence moyenne du total racinaire
- MO : Taux en matière organique
- CR : capacité de rétention en eau
- IA : Indice d'Aridité
- DSS : Durées de la Saison Sèche
- P : Précipitations
- T : Température
- ETP : Evapotranspiration Potentielle
- Wsur : Water surplus
- Wdef : Water deficit
- SE : Sidi Naamane
- ME : el Mergueb
- LE : Lekhneg
- BO : Béni Ounif
- VAM : Vesicular Arbuscular Mycorrhiza
- DSE : Dark Septate endophyte



Pistachier de l'Atlas adulte dans une région aride d'Algérie (Laghouat, 2007).

(Photo : Smail-Saadoun).



# Introduction générale et objectifs

Dans l'optique d'un réchauffement global qui paraît se confirmer d'étude en étude, les végétaux adaptés aux milieux arides constitueraient des alliés certains dans cet avenir incertain. L'Algérie, comme le reste du monde, doit s'inscrire dans cette approche et tenter d'exploiter ses ressources naturelles en termes de biodiversité, surtout celles appartenant aux vastes territoires arides qui constituent les 84% de sa superficie totale (FAO, 2001). En effet, son réservoir de biodiversité devrait potentiellement la placer parmi les leaders dans cette course mondiale à la recherche des espèces clés, qui permettront de s'adapter à un réchauffement global menaçant.

Parmi ces espèces clés, un phanérophyte spontané de ses zones arides suscite l'intérêt de beaucoup de laboratoires dont le nôtre. Il s'agit du pistachier de l'Atlas, *Pistacia atlantica* Desf.

Cette Anacardiaceae dioïque est considérée comme l'une des rares espèces arborescentes encore présente spontanément dans les régions semi-arides et arides, voire même sahariennes (Monjauze, 1980). Malgré les conditions de xéricité, le pistachier de l'Atlas développe des dimensions dendrométriques impressionnantes (jusqu'à 25 m de haut et 2 m de diamètre de tronc) (Nègre, 1962). Ses racines peuvent aller jusqu'à 6 m de profondeur ; la vigueur de son système racinaire lui permet ainsi de végéter sous une tranche pluviométrique très faible (Monjauze, 1968).

L'Algérie dispose d'une importante métapopulation (qui ne cesse de se fragmenter sous les pressions anthropozoïques) (Benhassaini et *al.*, 2007). Sa limite méridionale extrême se trouve en plein cœur du Hoggar (extrême sud du Sahara algérien), où des individus y existent à l'état de relique (Monjauze, 1967).

Le pistachier de l'Atlas est à la fois protecteur et productif (Monjauze, 1967). C'est un ingénieur autogène précieux dans ces milieux indigents. Il présente un effet « oasis » pour les espèces situées sous sa canopée (Ghanem et Benhassaini, 2008). De par la caducité de ses feuilles et son vaste système racinaire, il est une source précieuse en matière organique pour les sols et les peuplements qui y vivent. Les populations autochtones utilisent son bois comme combustible ; ses rameaux feuillés pour tanner le cuir (Ozenda, 2004), mais il est surtout utilisé comme fourrage pendant la saison estivale (Ouadah, 1982). Ses graines sont comestibles et très riches en acides gras monoinsaturés et en phytostérols (Ghanem et Benhassaini, 2008). Il est par ailleurs un excellent porte-greffe pour *Pistacia vera*.

Bien que beaucoup d'études aient été réalisées sur le pistachier de l'Atlas, en Algérie elles ont surtout ciblé sa partie aérienne, plus accessible. Nous pouvons citer non exhaustivement les travaux sur l'analyse de la variabilité morphologique de ses feuilles et ses fruits (Belhadj et *al.*, 2008), sur sa micromorphologie foliaire (Belhadj et *al.*, 2007) et ses stomates (Belhadj, 2007) ; les travaux d'Ait Saïd et *al.* (2011) sur sa morpho-anatomie et phytochimie foliaires ; les travaux de Hadj Aissa (2004) sur l'évolution de l'activité anti-oxydante de ses feuilles et de ses fruits. Par ailleurs d'intéressants travaux sur les endophytes foliaires associés à cette espèce ont été récemment réalisés dans le cadre des travaux de recherche du laboratoire « Ressources Naturelles » de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (Algérie). Nous citerons en l'occurrence ceux de Zareb (2014) et ceux de Benfoddil (2015).

Quant à sa partie souterraine, en l'occurrence son système racinaire, peu d'études ont été faites. En effet, beaucoup d'auteurs (Habib et *al.*, 1991 ; Melzi, 1993 ; Raimbault, 2003 ; Malamy, 2005 ; Watt and Weston, 2009) estiment que cet organe est laissé en général dans l'« ombre », alors qu'il est vital dans l'acquisition des ressources hydrominérales, et auquel la plante alloue de larges proportions de ses ressources (Fitter, 1987), jusqu'à 40% de ses assimilats carbonés (Morot-Gaudry et *al.*, 2009). Lorsqu'on sait que le développement des racines a été décrit comme l'évènement le plus dramatique dans l'évolution du règne végétal, parce qu'il a rendu possible la colonisation de l'environnement terrestre (Harper et *al.*, 1991 ; In Gibbens et Lenz, 2001), ce ne serait que justice que de redonner aux racines l'intérêt qu'elles méritent.

A notre connaissance, les seules études publiées et qui ont concernées son système racinaires sont ceux de Chaba et *al.* (1991) et ceux de Limane et Smail-Saadoun (2011). Par contre, il y a lieu de citer beaucoup de travaux d'ingénieurs et trois magisters (Limane, 2009 ; Boubrima, 2014 ; Mechiah, 2015) réalisés dans le cadre des activités de recherche du laboratoire « Ressources Naturelles » de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (Algérie).

Nous avons donc entrepris de consacrer cette thèse de doctorat, à une tentative de contribution à une meilleure connaissance de cette espèce, en mettant la lumière sur la face cachée et difficilement accessible qu'est son système racinaire. Notre approche se veut graduelle et intégrative. Nous avons voulu aller du comportement de l'individu au comportement des populations (au sens statistique). En effet, il nous a paru très intéressant dans la mesure du possible de suivre ces deux échelles et de voire ainsi comment, sous

l'influence du milieu, les variations individuelles influent sur les variations des groupes. Nous avons choisi des populations isolées géographiquement l'une de l'autre (populations probablement allopatriques) et végétant dans des biotopes différents situés sur un gradient d'aridité climatique croissante. Il s'agit de la population de Sidi Naamane, située dans la wilaya Médéa (climat semi-aride) ; de celle de la daya d'el Mergueb, située dans la wilaya de M'sila (climat aride) ; de celle de la daya de Lekhneg, située dans la wilaya de Laghouat (climat aride) ; et enfin de la population de Béni Ounif, située dans la wilaya de Béchar (climat hyperaride).

Cependant, ce différentiel n'est pas uniquement d'ordre climatique (*stricto sensu*), il est aussi édaphique. En effet, la genèse des sols des biotopes échantillonnés est liée consubstantiellement aux conditions climatiques qui y règnent. Ainsi, l'analyse des principales propriétés physicochimiques desdits sols et leurs confrontations aux architectures racinaires déployées par les individus qui y végètent permettrait *in fine*, de déterminer le poids de ces variables pédologiques dans l'expression d'architectures racinaires adaptées.

Par ailleurs, et disposant des racines fines de chaque population échantillonnée, nous les avons examinés pour une investigation des champignons (mycorrhiziens et endophytiques) potentiellement associés à cette espèce ; le mutualisme étant sûrement une des clés pour réussir sa survie dans de telles conditions d'indigence et d'adversité.

Au vu du volume de données obtenues et dans un souci de clarté et de lisibilité, nous avons choisi de scinder cette thèse en cinq chapitres :

le chapitre I concerne la description de l'espèce ;

le chapitre II traite des caractéristiques des zones d'étude et de l'échantillonnage ;

le chapitre III traite de l'adaptation des architectures racinaires du pistachier de l'Atlas en fonction du sol sous-jacent ; par ailleurs, et en vue d'optimiser l'exploitation des données obtenues, nous avons divisé ce chapitre en deux volets : le premier est une approche intra-populationnelle, le second évidemment inter-populationnelle ;

le chapitre IV concerne les résultats d'un statut mycorrhizien et endophytique, associés au système racinaire du pistachier de l'Atlas le long du même gradient ;

quant au chapitre V, il propose les conclusions inhérentes à ces travaux, ainsi que des perspectives qui nous paraissent pertinentes.

Chapitre I

# Description de l'espèce.

## 1. Noms vernaculaires et taxonomie

Dans sa publication « *Flora atlantica* » parue en 1798, le botaniste français René Louiche Desfontaines décrivait et présentait pour la première fois au monde scientifique le pistachier de l'Atlas.

Cet arbre imposant (Fig. 1) est selon les régions appelé entre autre « Iggh » ou « Iguer » en berbère, ou aussi « Bétoum » qui est un substantif arabe collectif dont le singulier est « Botma », « Bétouma » ou « Btouma » ou encore « Boutmaia » en Afrique du Nord et « Boutmela » au Proche Orient (Monjauze, 1980).



Fig. 1 : Pistachier de l'Atlas à Béni Ounif (Béchar, mars 2010) (Photo : Limane).

Selon l'*Angiosperm Phylogeny Group* (2003, *In Spichiger et al.*, 2004), cette essence appartient à l'ordre des Sapindales, famille des Anacardiaceae, genre *Pistacia*, espèce *Pistacia atlantica* Desf.

## 2. La plante

Ce bel arbre ressemblant à un frêne peut atteindre des proportions imposantes et un âge très avancé ; son bois est remarquablement dur (Ozenda, 2004). Non épineux à canopée dense et hémisphérique, Khaldi et Khodja (1996) ont répertorié des hauteurs variant entre 5 et 20 m selon les conditions éco-géographiques. D'après Monjauze (1980), les trois plus gros bétoums

jamais vu par lui, se trouvent à S'fisef (Tell Oranais), âgés de quelques trois cents ans. Leur houppier surbaissé atteignait 25 m de diamètre. L'un d'eux avait 6 m de circonférence de tronc. Certains bétoums adultes centenaires dans le nord-ouest algérien ont une superficie des couronnes (sous canopée) d'environ 150 m<sup>2</sup> chacun (Benhassaini et *al.*, 2007).

Selon Nègre (1962), cette essence ligneuse peut atteindre 25 m de haut, son tronc est court pouvant dépasser 2 m de diamètre. Ils peuvent atteindre selon Belhadj (2001) 25 m de hauteur et entre 4,5 à 5 m de circonférence.

### 3. Système racinaire

Son système racinaire n'est pas moins impressionnant (Fig. 2). En effet, selon Chaba et *al.* (1991) (qui ont travaillé sur des plants élevés en pépinière), le pistachier présente un système racinaire vigoureux. Au stade juvénile, il développe rapidement un pivot pour que la plante puisse se fixer au sol et s'alimenter. Mais au stade adulte, le pivot peut se développer et se lignifier, comme il peut disparaître et laisser place aux racines secondaires pour se développer et donner par la suite un système racinaire à extension latérale ou superficielle.



Fig. 2 : Système racinaire généralisé du pistachier de l'Atlas (Béni Ounif, mars 2010)

(Photo : Limane).

Ozenda (1977) fasciné devant l'hypertrophie du système racinaire des végétaux désertiques, écrivait que les racines du pistachier présentaient un allongement de 1,5 m en une seule saison ! Selon Germana (1997), elles peuvent atteindre 5 à 6 m de profondeur.

Cette essence présente une architecture racinaire bien hiérarchisée, comportant un épais pivot vertical orthogéotrope à croissance rapide et indéfinie, et de fines racines latérales plagiotropes à croissance lente (Chaba *et al.*, 1991). Ses radicelles ont montré une fréquence de mycorhization élevée et à forte intensité, ainsi que la présence de mycoendophytes (Mechiah, 2015).

#### 4. Feuilles

Les feuilles du pistachier de l'Atlas sont composées et astipulées (Quézel et Santa, 1963) (Fig. 3). Elles sont caduques l'hiver. Cette caducité permet de créer une litière sous-pistachier qui constitue une source potentielle de matière organique fertilisante.

Ses feuilles présentent une surprenante variabilité inter et intra individuelle constituant un énorme créneau de recherche sur la plasticité de cette essence. En effet, d'après Nègre (1962), ses feuilles sont imparipennées, alternes, ovales, sessiles et une terminale à rachis non ou à peine ailé. Elles sont, selon Monjauze (1980), peu coriaces, à 7-11 folioles de (2.5-6) x (0.5-1.5) cm, alternes et mesurent rarement plus de 12 cm de longueur totale. Zohary (1996) les décrit comme peu coriaces, composées de 3 à 5 paires de folioles. Quant à Ozenda (2004), il décrit des feuilles à 7-9 folioles, à pétiole un peu ailé.

Les feuilles du pistachier de l'Atlas sont bien adaptées au manque d'eau. En effet, les travaux de Smail-Saadoun (2005) ont montré chez les populations étudiées, l'absence totale de stomates au niveau de la face supérieure (adaxiale) des feuilles et la présence des stomates au niveau de la face inférieure (abaxiale) de la feuille. Cependant, Belhadj *et al.* (2007) ont, quant à eux, trouvé que les stomates sont aléatoirement dispersés sur toute la surface abaxiale, mais que sur la surface adaxiale, les stomates existent et sont localisés proche de la nervure principale.

Les travaux de Belhadj *et al.* (2008) sur l'analyse de la variabilité morphologique de ses feuilles, et ses travaux sur les types stomatiques (Belhadj, 2007) ont montré l'étendue de l'adaptabilité des feuilles du pistachier de l'Atlas aux milieux arides.

Par ailleurs, les travaux d'Ait Saïd *et al.* (2011) sur sa morpho-anatomie et phytochimie foliaires ont montré une grande plasticité des caractères morpho-anatomiques et phytochimiques des feuilles de cette espèce. En effet, ils concluaient que son accommodation à l'aridité s'expliquerait par une augmentation des teneurs en terpènes qui seraient probablement en relation avec l'accroissement des épaisseurs du parenchyme palissadique et la forte densité de poils glanduleux.



Fig. 3 : Feuilles du pistachier de l'Atlas à Béni Ounif (Mars 2010). (Photo : Limane).

Les travaux originaux de Zareb (2014) et Benfoddil (2015) ont montré la présence des champignons endophytes au niveau de tous les compartiments des feuilles du pistachier de l'Atlas, ce qui fait de cette espèce (au moins appartenant aux populations échantillonnées) un hotspot de biodiversité en mycoendophytes foliaires. Ces derniers sont considérés comme une source importante de métabolites secondaires.

## 5. Fleurs

Gaussen et *al.* (1982) disaient que « *Pistacia* est de par sa dioïcie et ses fleurs nues (apétales), un genre particulier des Anacardiacees ». En effet, les fleurs mâles et les fleurs femelles sont sur des pieds différents (plante dioïque). Les fleurs sont en grappes lâches (Ozenda, 2004). Les fleurs mâles (Fig. 4, Fig. 5 et Fig. 9) sont groupées en inflorescences en forme de thyse<sup>1</sup>, jointes à leurs bases et portant à leurs extrémités des sacs polliniques de couleur jaune. El Oqlah (1996) décrit des fleurs mâles composées de 5 étamines, dont les anthères sont souvent larges avec un court bec au niveau de l'apex.

---

<sup>1</sup> Type d'inflorescence composée correspondant à une grappe de cymes.

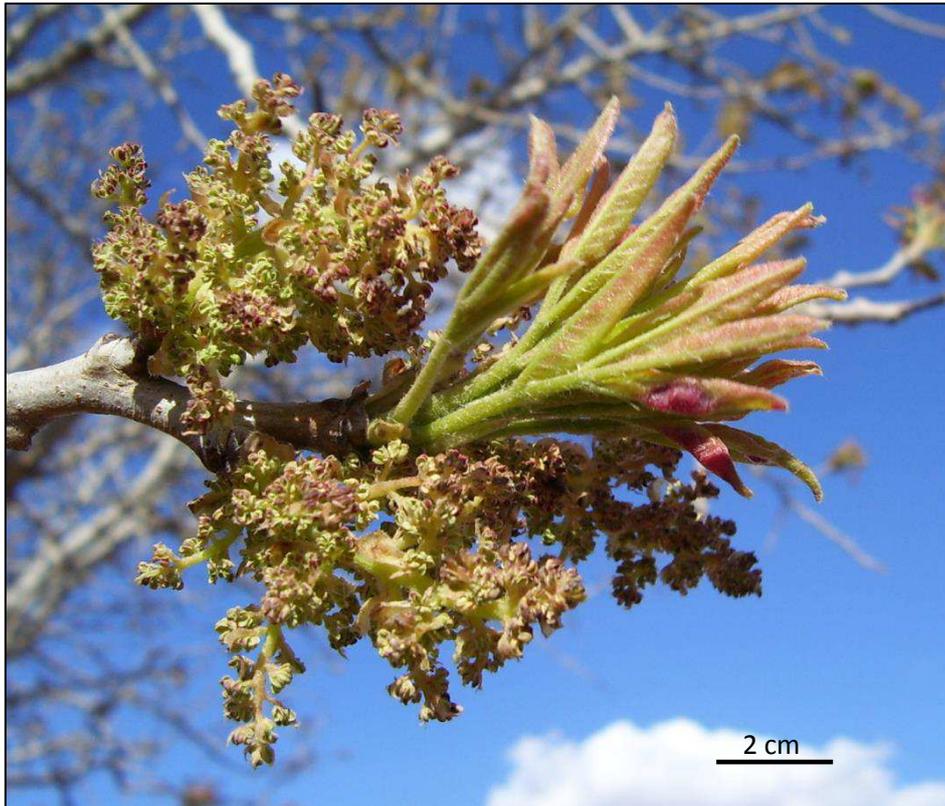


Fig. 4 : Inflorescences mâles du pistachier de l'Atlas (daya d'el Mergueb, mars 2008)  
(Photo : Limane).

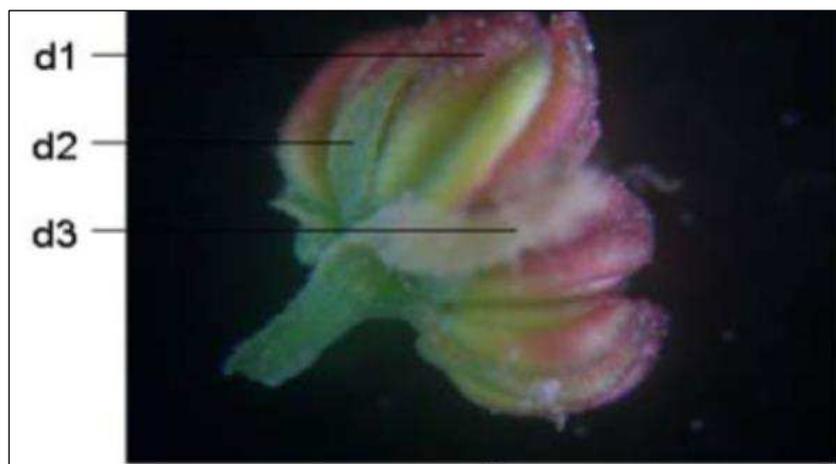


Fig. 5 : Fleur mâle isolée (x40) du pistachier de l'Atlas (d1 : anthère, d2 : sépale, d3 : bractée)  
(In Yaqoobi et al., 2009).

Les fleurs femelles (Fig. 6 et Fig. 9) sont groupées en courtes panicules (de couleur variant du jaune au vert) et qui contiennent des ovaires renfermant un seul et unique ovule (Khaldi et Khodja, 1996). Les fleurs femelles sont à 3 stigmates arqués au dehors (Nègre, 1962). D'après Zohary (1952), toutes les espèces appartenant à ce genre sont dioïques et leurs fleurs sont unisexuées, nues et anémophiles.

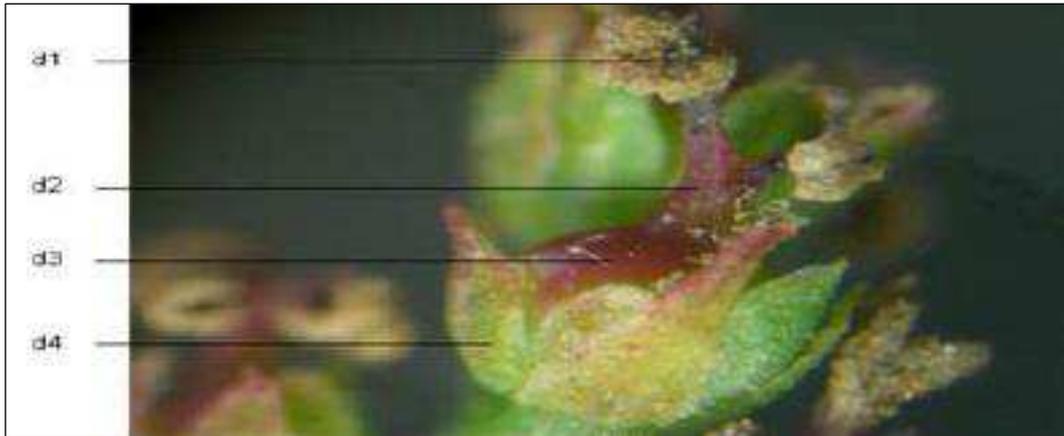


Fig. 6 : Fleur femelle isolée (x50) du pistachier de l'Atlas, (d1 : stigmaté ; d2 : style ; d3 : ovaire ; d4 : sépale) (*In* Yaqoobi et *al.*, 2009).

## 6. Fruits

Les populations locales appellent ses fruits « Elkhodiri » à cause de la prédominance de la couleur vert foncé à sa maturité (Fig. 7, Fig. 8 et Fig. 9). Ce sont des drupes de la taille d'un pois, légèrement ovales quelquefois plutôt allongées ; plus rarement, sensiblement trapues ou un peu aplaties, à épiderme qui se ride en séchant sur un endocarpe induré, mais très mince abritant deux cotylédons exalbuminés, riches en huile et comestibles. Ce sont si l'on veut de petites noix (Monjauze, 1980).



Fig. 7 : Fruits en maturation du pistachier de l'Atlas (Sidi Naamane, avril 2010)  
(Photo : Limane).



Fig. 8 : Fruits mûrs (x20) du pistachier de l'Atlas (el Mergueb, mars 2008) (Photo : Limane).

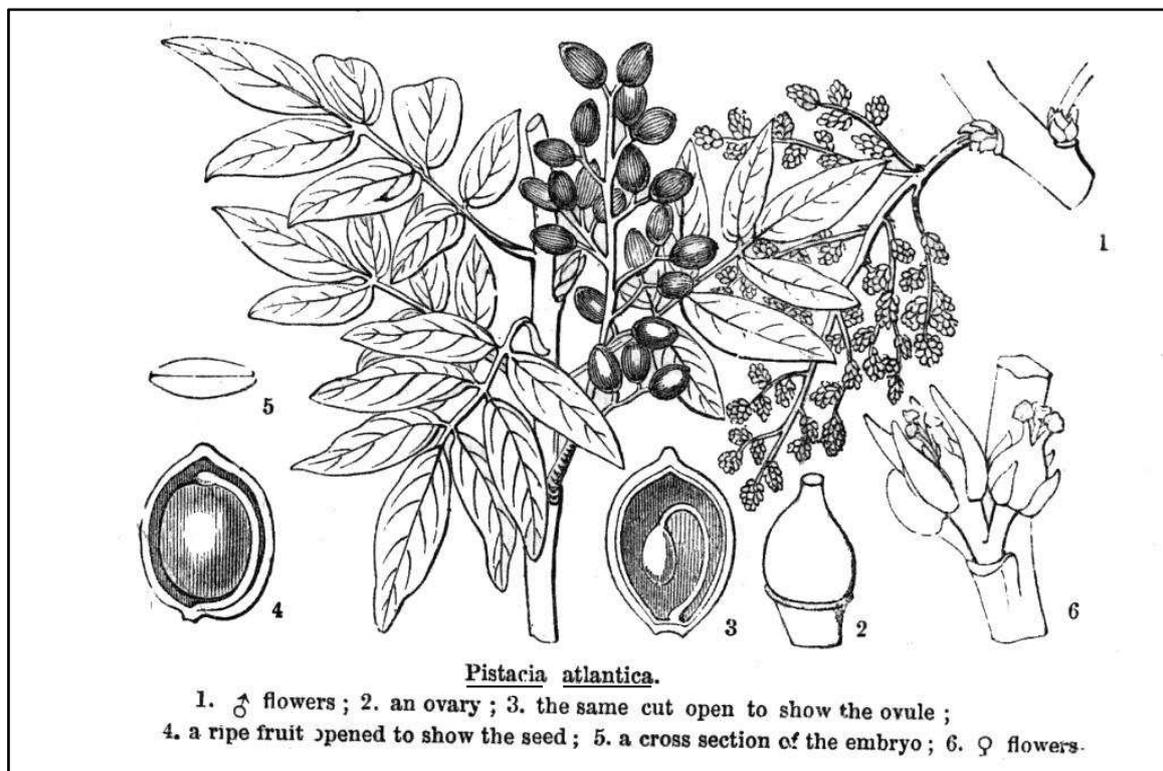


Fig. 9: Feuilles, fleurs (1. Mâle ; 6. Femelle ; 2. Ovaire et 3. Le même ovaire coupé pour voir l'ovule) et fruits (4. Fruit mûr ouvert pour montrer la graine ; 5. Coupe transversale de l'embryon).

(Modifié d'après Monjauze (1980) et <http://delta-intkey.com/angio/images/pista465.gif>.)

Ozenda (1977) le décrit comme une drupe monosperme mesurant 6 à 8 mm de longueur et 5 à 6 mm de largeur, de couleur rougeâtre. Selon le même auteur, ce fruit est gros comme un pois, rougeâtre puis virant au bleu. Pour Khaldi et Khodja, (1996), ses fruits sont de petite taille (ne dépassant guère 0,5 cm), ovales, de couleur verte juste à leur formation puis tournant au bleu foncé ou noir selon les individus. Chaque fruit contient une seule graine, dont la maturité coïncide avec la fin de l'été (août-septembre).

### **7. Exigences édapho-climatiques et chorologie inhérente**

C'est une espèce qui résiste à la sécheresse et s'adapte aux régions semi-arides et arides (El Mouslimani, 1986, *In* Tahrou, 2005). Elle supporte des températures élevées (49°C à Ghardaïa), mais aussi des basses températures (-12°C à Djelfa) (Chaba et *al.*, 1991).

Elle se développe en général sous une pluviométrie de 200 à 250 mm/an (Sahli, 1997, *In* Tahrou, 2005), mais on la retrouve à sa limite septentrionale à l'ouest d'Alger et au versant nord du Zaccar recevant 1000 mm/an (Morsli, 1992, *In* Mellah, 2007), comme on la retrouve à Tamanrasset, dans les montagnes du Hoggar, où elle y végète avec seulement 47,6 mm/an (Kadi-Bennane et *al.*, 2005).

Le pistachier de l'Atlas est une espèce héliophile. Bien que les jeunes individus se développent sous leurs plantes-abris (le jujubier, le figuier de Barbarie,..), la lumière nécessaire leur parvient (Ait-Radi, 1979).

Selon Nègre (1962), le pistachier de l'Atlas est indifférent au type de sol. Il occupe une variété de sols qui se caractérisent par un pH élevé (alcalins) et pauvres en matière organique (Brown et *al.*, 1994, *In* Mellah, 2007). En effet, selon Abdelkrim (1986), le calcaire ne semble pas affecter son développement. Abdelkrim (1992) le qualifie d'espèce calcicole. Cette essence se porte bien sur les sols limono-argileux, et se développe sur les roches calcaires où les racines s'insinuent et se développent à l'intérieur des fissures (Khaldi et Khodja, 1996). Il préfère, selon Seigue (1985), les terrains argileux et les alluvions des plaines. Selon Quézel et Médail (2003), le pistachier de l'Atlas peut occuper les fentes de rochers et de falaises (dans ce cas, sous forme d'individus prostrés et plaqués aux rochers), les terrains plats sur sols profonds ou rocailloux, les lits d'oueds ou les grandes dépressions temporairement humides.

Selon Médail (2001, *In* Quézel et Médail, 2003), le genre *Pistacia* est apparu dans la végétation méditerranéenne à l'Oligocène il y a 23,8 Ma (milieu du tertiaire), et l'espèce *Pistacia atlantica* Desf. y est apparue durant la même ère mais un peu plus tard, au Miocène (il y a 5,33 Ma). Le pistachier de l'Atlas de par sa nature « spartiate », occupe des zones très

disparates ayant comme référent biogéographique principal le bassin méditerranéen (Fig. 10).

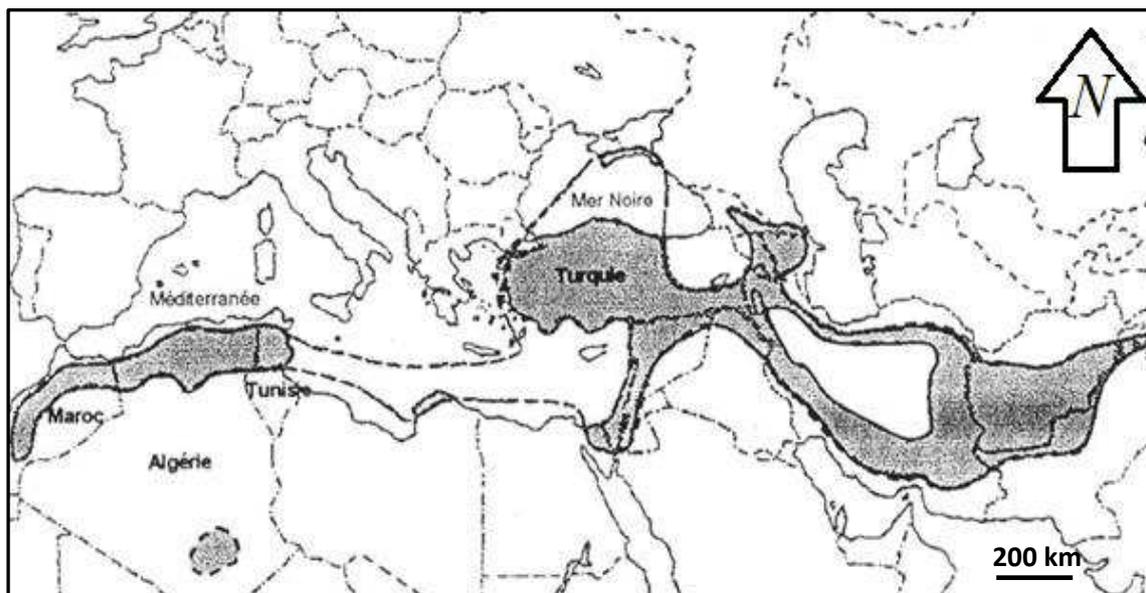


Fig. 10 : Carte de distribution de *Pistacia atlantica* Desf. dans le monde (modifié d'après Alyaif (1979) ; Browicz (1988) et Khaldi (comm.pers. In Zohary (1996) ; Belhadj (2007)).

Monjauze (1980) le décrivait comme un arbre qui colonise de façon diffuse un territoire considérable, centré sur les pays méditerranéens à saison sèche et chaude bien marquée. Quézel et Médail (2003) le compte parmi les éléments arborés communs à la région méditerranéenne et à la région irano- touranienne.

Sa présence, certes quelques pieds isolés, dans des régions aussi inattendues que le Hoggar témoigne de l'influence méditerranéenne de ces régions inhérente à la période glaciaire, pendant laquelle lesdites régions sont considérées comme zones refuges pour beaucoup d'espèces.

Le « Bétoum » est considéré par Monjauze (1968) comme une espèce ubiquiste qui s'étend des îles Canaries (océan Atlantique, au large du Maroc méridional) jusqu'au Pamir (massif montagneux de l'Asie centrale ; Tadjikistan), en passant par :

- l'Afrique du Nord, le Sahara septentrional et Tripolitaine, avec relique au Hoggar ;
- Chypre, Rhodès, la Turquie, la Bulgarie, le Caucase, la Transcaucasie et l'Arménie ;
- la Palestine, la Syrie, la Jordanie, l'Irak et l'Iran ;
- l'Arabie, le Baloutchistan et l'Afghanistan.



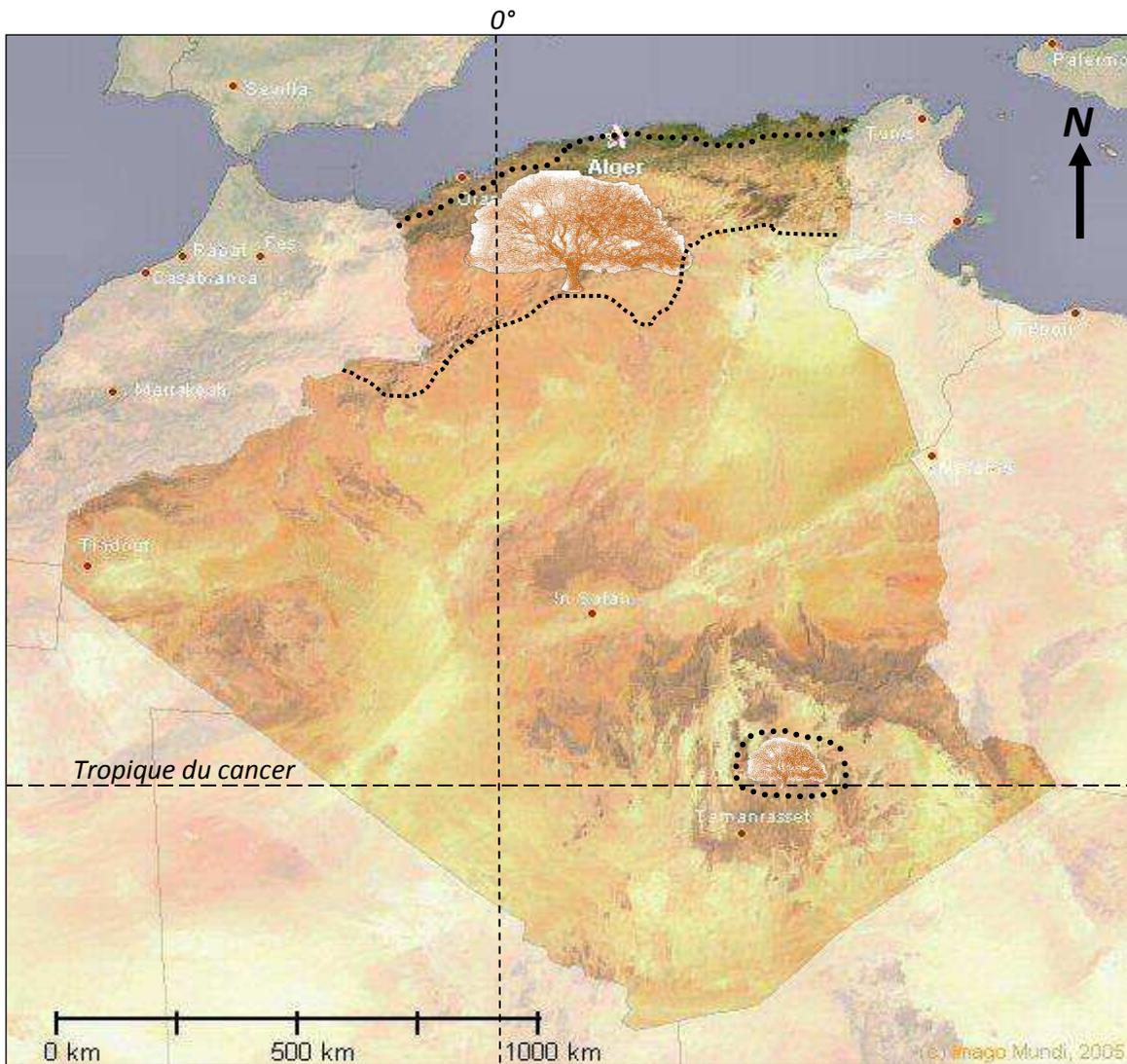


Fig. 12: répartition du pistachier de l'Atlas (*Pistacia atlantica* Desf.) en Algérie.

## 8. Intérêts de l'espèce

Cette espèce ligneuse « née pour résister » présente un profil morpho-physiologique garant d'une lutte efficace contre la désertisation.

Déjà en 1967, Monjauze le qualifiait d'« arbre à la fois protecteur et productif ». En effet, cette description lui sied fort bien, car :

- étant un arbre, il est classé parmi les indispensables espèces ingénieurs autogènes ; en effet, de par sa simple présence et sa pérennité, il joue un rôle vital pour les autres espèces vivantes structurées autour de lui dans un réseau interactif complexe ; en plus du fait qu'il est un producteur primaire de matière organique, il est aussi un pourvoyeur en abris, perchoir et reposoir pour les différents oiseaux et insectes (Fig. 13) ; à sa base, des mammifères et reptiles établissent des terriers sans oublier la microflore et microfaune qui lui sont associées ;

il installe et entretient ainsi une véritable biodiversité garante de la revitalisation de ces milieux et, *in fine*, leur revalorisation ;



Fig. 13: nids d'oiseaux sur le pistachier de l'Atlas dans la daya d'el Mergueb (Mars 2008)  
(Photo : Limane).

- il présente un effet « oasis » pour les espèces situées sous sa canopée (Benhassaini et *al.*, 2007) ; en effet d'après Ghanem et Benhassaini (2008), certains bétoums adultes, centenaires, montrent une superficie des couronnes (sous canopée) d'environ 150 m<sup>2</sup> chacun, créant un microclimat favorable à l'installation d'un cortège floristique et par extension trophique, faunistique ;

- la plasticité et la vigueur de son système racinaire le plus souvent généralisé (Ait Slimane, 2004 ; Tahrou, 2005 ; Chebieb, 2008 ; Kebci, 2008 ; Abdous, 2010 et Haboul, 2011) et sa croissance rapide assurent la stabilité du sol (anti-érosion) et une action d'enrichissement de ce dernier grâce à son interface rhizosphérique conséquente d'une part et d'autre par son humification grâce à la caducité de ses feuilles, favorisant ainsi l'installation d'une microflore et microfaune prélude à un sol vivant ;

- son houppier impressionnant expose une surface photosynthétique conséquente, ce qui en fait un excellent fixateur de CO<sub>2</sub>, donc réservoir à carbone, contribuant ainsi à diminuer la quantité des gaz à effet de serre ;

- c'est une essence polytypique au complexe stomatique à potentialités évolutives accusées, s'adaptant « efficacement » au gradient de xéricité croissant (Kadi-Bennane et *al.*, 2005), ce qui confirme sa plasticité vis-à-vis de la sécheresse atmosphérique décrite par Monjauze (1980) ;

- les graines de bétoum sont très riches en lipides avec une grande teneur en acides gras monoinsaturés et en phytostérols, teneurs comparables à celles de l'huile d'olive, et qu'on commence à peine à entrevoir ces vertus thérapeutiques et nutritionnelles envers certaines pathologies (Ghanem et Benhassaini, 2008) ;

- l'écorce, selon Monjauze (1980), se caractérise par la production de résine (Fig. 14) ; celle-ci peut être distillée mais exsude naturellement par temps chaud et elle est d'autant plus abondante que la station est favorable par sa température, c'est une résine-mastic, en quelque sorte un ancêtre méditerranéen du chewing-gum, dont les populations locales faisaient autrefois quelques usages et dont la pharmacie s'est longtemps servi pour la fabrication d'onguents<sup>2</sup> ; il est selon Ansar (1996), utilisé dans la médecine traditionnelle ; (antitussif, maladies gastriques, anti-rhume, anti-stress, soin capillaire,...)

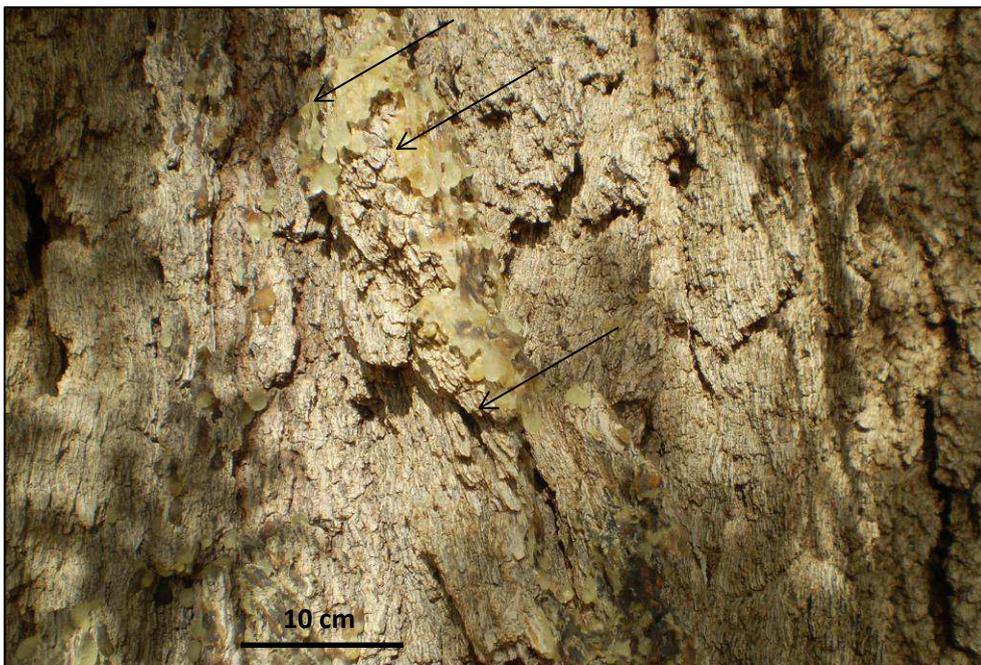


Fig. 14: écorce de pistachier de l'Atlas exsudant de la résine (flèches) (Photo : Limane, 2010).

<sup>2</sup> -Médicament à consistance de pommade dure, destiné à être appliqué sur la peau, et dans la composition duquel entre une résine.

- ces rameaux feuillés sont utilisés pour tanner le cuir (Ozenda, 2004), mais surtout comme fourrage pendant la saison estivale parce qu'elles constituent d'après Ouadah (1982) un apport en unités fourragères d'environ 0,35 U.F et 41 gr de matière azotée digestible par Kg de matière sèche.

- il est un excellent porte-greffe d'une autre espèce de pistachier, *Pistacia vera* (le pistachier vrai), qui est le producteur des pistaches à forte valeur marchande (Aletà et *al.*, 1997).

Chapitre II

# Caractéristiques des zones d'étude et échantillonnage.

## 1. Choix des stations

Le choix des stations est dicté d'emblée par l'exigence de suivre un gradient d'aridité climatique et édaphique croissant, en accord avec la problématique posée. Il se trouve qu'en Algérie, l'aridité augmente *crescendo* du nord (littoral méditerranéen) vers le sud (Sahara). Nous avons donc choisi des populations de pistachier de l'Atlas situées sur un transect nord-sud.

Cependant, et sur le terrain, ces choix ont été limités par des considérations d'ordre pratique, comme l'accessibilité aux sites et d'ordre statistique (nombre d'individus suffisant). Finalement, le choix s'est porté sur les quatre stations dont la figure 15 illustre la situation administrative. Il s'agit respectivement du nord vers le sud de Sidi-Naamane (wilaya de Médéa), de la daya d'El-Mergueb (wilaya de M'sila), de la daya de Lekhneg (wilaya de Laghouat) et de Béni Ounif (wilaya de Béchar).

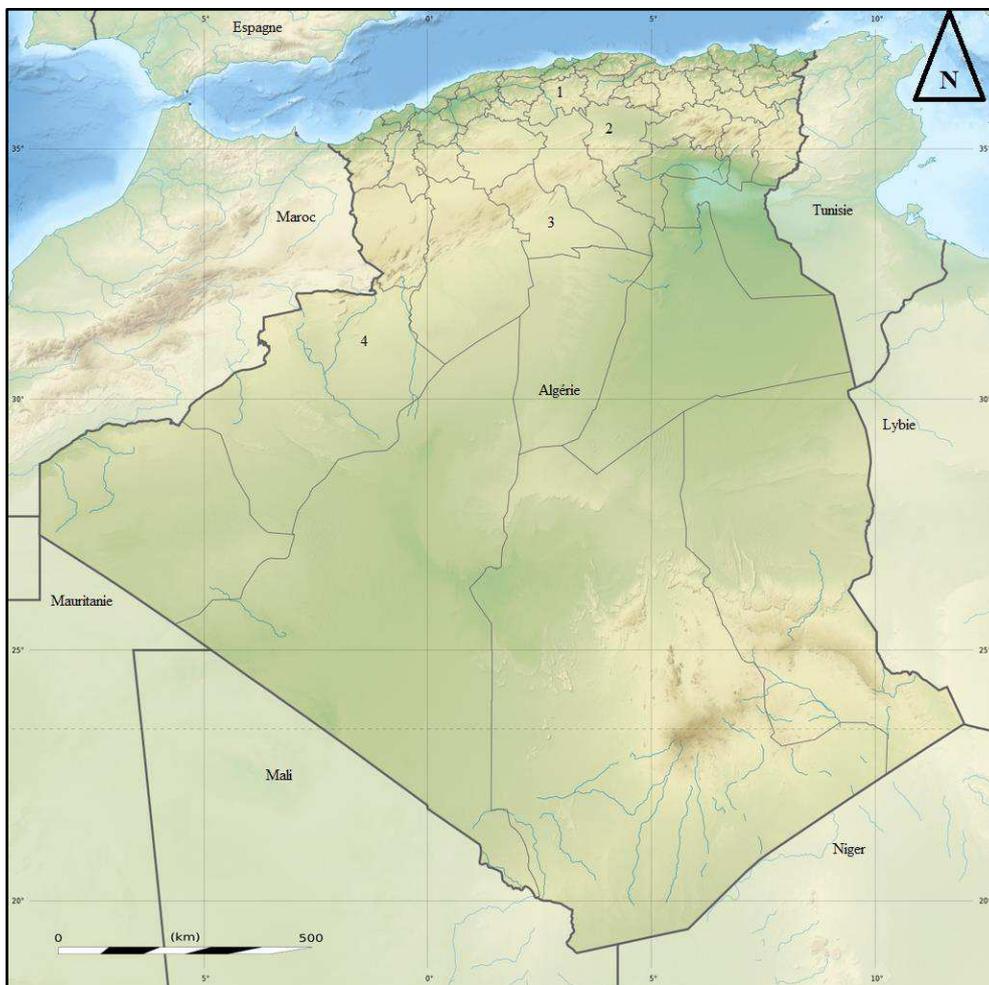


Fig. 15: localisation géographique des quatre wilayas abritant nos stations : Médéa (1), M'sila (2), Laghouat (3) et Béchar (4).

(Source : <http://idata.over-blog.com/4/24/40/94/Carte-Algerie.jpg>).

## 2. Présentation des zones d'étude

Excepté la station d'el Mergueb (wilaya de M'sila) qui a bénéficié d'un descriptif presque complet réalisé par Kaabache (2003) dans le cadre d'un PNUD, il faut signaler le manque de bibliographie accessible pour une description adéquate et équilibrée des trois autres stations. Nous présentons comme suit, les résultats de cette recherche bibliographique et de nos observations sur le terrain.

### 2.1. Station de Sidi Naamane (wilaya de Médéa)

#### 2.1.1. Situation géographique

La wilaya de Médéa se situe à environ 80 Km au sud d'Alger, et au cœur de l'Atlas Tellien. Elle occupe une superficie de 8700 km<sup>2</sup>. Elle est caractérisée par un relief accidenté, enserrant quelques plaines assez fertiles, mais de faible extension pour s'estomper ensuite aux confins des Hautes Plaines Steppiques, en une série de collines mollement ondulées. Une telle position stratégique a fait de la région une zone principale de transit et un trait d'union entre le Tell et le Sahara, d'une part et entre les Hauts Plateaux de l'est et ceux de l'ouest, d'autre part (Medjnoun, 2014). La commune de Sidi Naamane fait partie du territoire de la wilaya de Médéa (Fig. 16). Elle se situe au versant sud de l'Atlas Blidéen, plus précisément dans la -

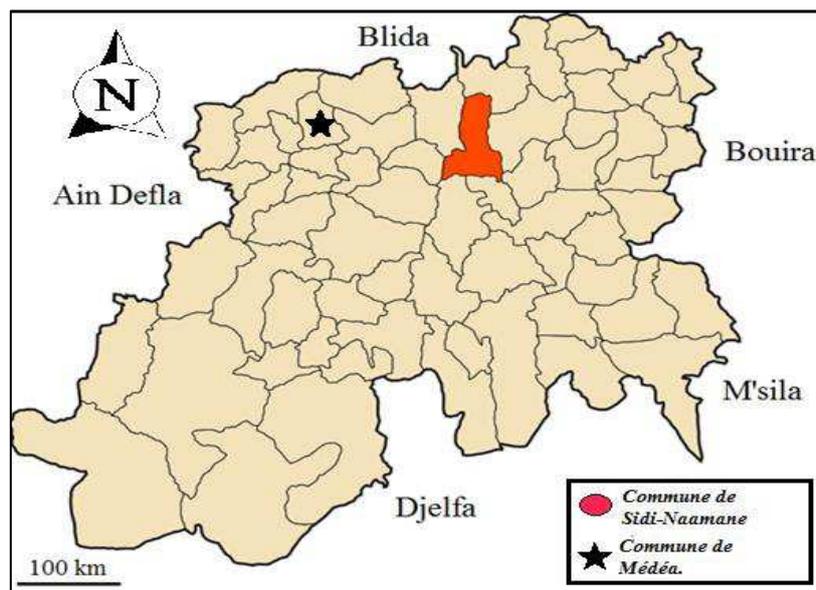


Fig. 16: localisation de la commune de Sidi Naamane au sein de la wilaya de Médéa

(Source: Wikimedia.org).

partie méridionale de la crête des Béni Guitoune et la forêt de Grinane. Elle constitue la partie nord-ouest de la plaine de Béni Slimane (Khelifati, 2013).

### 2.1.2. Cadre géologique

Cette station appartient au domaine externe appelé aussi zones externes de l'Atlas tellien, formé de plusieurs chaînons. Les zones externes forment une large bande entre les zones internes et l'avant pays pré-atlasique, on distingue :

- L'autochtone ou parautochtone du Tell (massif à schistosité), comprend le littoral Oranais, Cheliff, Dahra, Blida et Babors.
- L'autochtone intra-tellien des Bibans e de l'Ouarsenis
- Les nappes telliennes, ensemble allochtone (désolidarisés de leur substratum), mises en place par gravité au cours du Miocène inférieur (Tertiaire).

Cette zone est appelée aussi Tell méridional, constituée d'un ensemble de nappes allochtones composées de marnes d'âge Crétacé moyen à Paléogène charriés sur une centaine de Km vers le Sud. Ces terrains organisés en unités tectoniques empilées les unes sur les autres (Bouillin, 1986).

### 2.1.3. Hydrographie

La région de Sidi Naamane présente les caractéristiques hydrogéologiques suivantes (Khelifati, 2013) :

- absence de ressources en eaux profondes ;
- faible développement des roches perméables du point de vue épaisseur ;
- nombre appréciable de petits exutoires sous forme de sources à faibles débits.

### 2.1.4. Phytosociologie

Dans les régions telliennes subhumides (région de Médéa), on passe assez brutalement des groupements forestiers et de dégradation forestière (série du pin d'Alep à chêne liège, souvent à chêne vert) aux groupements de cultures (Pouget, 1980a).

*In situ*, les paysages de la station de Sidi-Naamane échantillonnée consistent en de vastes champs céréaliers traversés par des oueds à régimes saisonniers et fragmentés par des routes nationales et autres pistes agricoles (Fig. 17). Les arbres, principalement des eucalyptus aux alentours des fermes et des pistachiers de l'Atlas majoritairement repoussés aux lisières des champs, ou contraint de suivre le réseau hydrographique pour former une sorte de « ripisylve », en association avec le laurier rose (*Nerium oleander* L.) et le jujubier sauvage (*Ziziphus lotus*). Rarement, on peut distinguer çà et là et exclusivement de vieux individus, seuls au milieu des vastes champs. La population de pistachier de l'Atlas originelle a été vraisemblablement fragmentée et réduite ainsi à végéter dans les lits d'oueds à l'abri des activités anthropiques (Fig. 18).



Fig. 17: image satellite d'une partie de la population de pistachier de l'Atlas de la station de Sidi Naamane (Flèches) (Source : Google earth, 2015).



Fig. 18 : vues de l'intérieur de la population de pistachier de l'Atlas de Sidi Naamane, montrant un erme à *Asphodelus microcarpum* et *Drimia numidica* sur Talweg à pente moyenne. (Avril 2010). (Photos : Limane)

L'avantage pour notre étude est que nous y disposons de presque toutes les tranches d'âges, des jeunes sujets, difficilement accessibles car protégés par les touffes épineuses de jujubier (leur plante nurse) ; des sujets âgés imposants qui se sont le plus souvent affranchis de cette protection en passant par des âges intermédiaires. Une strate herbacée hétéroclite (principalement *Galactites* et *Asphodelus*), colonise les espaces entre les individus.

## 2.2. Station d'el Mergueb (wilaya de M'sila)

### 2.2.1. Cadre géographique

D'après Kaabache (2003), le site de la réserve d'el Mergueb se situe à la latitude nord 35°40' et la longitude ouest 03°55'. La réserve est située à 150 Km au sud-est d'Alger. Elle appartient à l'ensemble des Hautes Plaines Steppiques, vaste territoire «asylvatique» qui s'étend entre l'Atlas Tellien au nord et l'Atlas Saharien au sud, constituant l'extrémité orientale des steppes Algéro-oranaises. La réserve fait partie de la plaine du Hodhna (wilaya de M'sila) (Fig. 19).

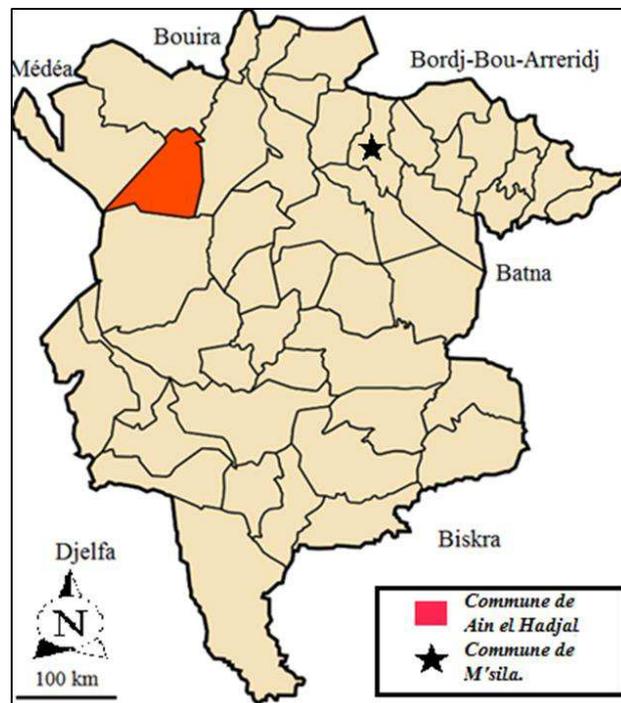


Fig. 19: localisation de la commune de Ain el Hadjal (abritant la daya d'el Mergueb) au sein de la wilaya de M'sila (Source : Wikimedia.org, 2015).

Le site de la réserve, facilement accessible par route (RN 40, M'sila-Alger et RN 8 Bousaada-Alger), relève de la wilaya de M'sila, mais s'étend sur deux agglomérations chef-

lieu de daïra: la daïra de Aïn el Hadjel à l'ouest et celle de Sidi-Ameur au sud-est. D'une superficie de 16.481 ha, 42 ares et 67 ca, le territoire de la réserve dépend, sur le plan administratif, de 3 communes : Sidi Hadjres (Daïra de Aïn el Hadjel) au nord et à l'est, Sidi Ameur au sud (daïra de Sidi Ameur) et à l'ouest Aïn el Hadjel (daïra d'Aïn el Hadjel).

La réserve est ainsi délimitée :

- au nord, par la RN 40 qui longe l'Oued Laham ; celui-ci se déverse dans la dépression du Chott El-Hodna ;
- à l'est par diverses dépressions, notamment la daya et la zone d'épandage des eaux de Oued El-Guersa ;
- au sud et l'ouest par une série de reliefs, sans liaison nette entre eux et dont l'altitude relative n'excède pas quelques centaines de mètres : Djebel Hachelaf (707 m), Oum el Mrazem (725 m), Drabine (707 m), djebel Zbara (576 m).

De par cette position géographique, la réserve ainsi délimitée, se trouve au contact de quatre ensembles structuraux : les Hautes Plaines Steppiques, l'Atlas Saharien, le Bassin du Hodna et enfin la plate-forme saharienne. Cette position charnière offre, par sa diversité climatique, géomorphologique et édaphique, de nombreux sites et habitats de qualité indéniable sur le plan de la biodiversité et cela sur un territoire d'étendue relativement restreinte. Ce cadre géographique fait que la réserve constitue également, un site privilégié d'étude et d'observation des processus de désertification.

La population de pistachiers de l'Atlas échantillonnée appartient à cette réserve (Fig. 20). Ses individus sont clairsemés dans ces vastes espaces exploités illégalement par les autochtones dans le cadre d'activités agropastorales (Fig. 21).

### **2.2.2. Cadre géologique**

La station est située au Nord de l'Atlas Saharien (domaine Pré-atlasique) et au Sud des Monts du Hodna (Plaine du Hodna/Bassin du Hodna).

La géologie de cette région est assez complexe de par sa position au contact de l'Atlas Tellien et de l'Atlas Saharien. Selon Le Houerou et *al.*, 1975 et Le Houérou et Claudin (1972), la géologie d'El hodna se caractérise par :

- Les formations du Secondaire : qui comprennent :
  - Crétacé supérieur : formation largement marquée par des grés, des argiles et des calcaires, il est bien rependu dans la région de Boussaâda avec ses différentes formations.



Fig. 20: image satellite d'une partie de la daya d'el Mergueb abritant une partie de la population de pistachier de l'Atlas (flèches) (Source : Google earth, 2015).



Fig. 21: pelouse à faible dénivelé de la daya d'el Mergueb (Mars 2008) (Photos: Limane).

- Les formations du Tertiaire

- Eocène: Les formations de l'Eocène varient suivant les zones, l'Eocène débute par des calcaires blancs à intercalations de marnes se terminant par un ensemble conglomératique. L'Eocène est représenté par des grès rouges, des argiles variées viennent ensuite des calcaires et des conglomérats. Ils constituent les contreforts méridionaux des Monts du Hodna.

-Miocène: Les séries continentales sont constituées d'une alternance d'argile sableuse, de grès, de sables, de graviers et de conglomérats.

- Les formations du Quaternaire : ce sont des alluvions anciens constitués essentiellement par des sédiments fins :

-Alluvions: Ce sont des limons à couleur grise, ces formations sont riches en matière sableuse, les graviers sont rares.

-Cône de déjection: Il existe d'important cône de déjection située sur le flanc de Sud-Ouest de la région de M'Sila.

-Alluvions actuelles: Sont peu représentés, ils existent au niveau des lits des Oueds.

-Dunes: Localisées dans la région centrale au Sud et au Sud-Ouest du Chott El hodna, au Sud du Zahrez El Chergui et vers Bou-Saada ils sont formés de sable quartzeux fins parfois chargés de matériel argileux.

-Chott: Formé de limon gris à cristaux de gypse comme les roses des sables

### **2.2.3. Géomorphologique**

Selon Kaabache (2003), l'ensemble structural des Hautes Plaines Steppiques, auquel appartient la réserve, est constitué par d'épais dépôts alluvionnaires plus ou moins horizontaux accumulés sur le socle primaire. Ces dépôts sont largement recouverts d'une croûte calcaire, indice de conditions d'aridité climatique extrême. Au sein de la réserve, le relief peu accentué oscille entre 725 m (Oum El aadame) et moins de 500 m au fond des nombreuses dépressions. Ce relief comprend quelques massifs isolés entre lesquels s'étendent de vastes surfaces encroûtées au sein desquelles s'organise un réseau hydrographique de type endoréique. Au sein de la réserve, les unités structurales suivantes peuvent être distinguées :

- les djebels, « kefs » et « dalaat » reliefs rares et peu élevés (Oum el Mrazem, 725 m ; Drabine, 707 m ; djebel Zbara, 576 m) sont composés d'une alternance de marnes argileuses et de niveaux calcaires durs relevant du Cénomaniens ;

- les « draas » et les « Chebka » sont des glacis plus ou moins ravinés de surface plane ; ce type de modelé géomorphologique est constitué par des dépôts alluviaux du Quaternaire ; ces glacis rocaillieux et rocheux, le plus souvent en forme de dalles sont

découpés dans tous les sens par de véritables ravines équivalentes aux mailles d'un filet (ou "Chebka") [il s'agit de fractures liées à l'héritage tectonique de la région];

- les « dayas » correspondent à des zones de concentration des eaux de ruissellement, ces dépressions sont également le lieu privilégié de décantation de diverses particules en suspension ; à une telle localisation correspond un sol relativement profond, à texture limono-argileuse ; la réserve se distingue par de nombreuses dayas ; l'une d'elles abrite la population échantillonnée lors de cette étude ;

- les « Feidh », zones d'épandages des eaux et de débordement des oueds, se caractérisent par un important dépôt de matériau à texture grossière à moyenne ;

- les *nebkhas* (Fig. 22) (ou nebkas pièges) correspondent à une accumulation de sable quartzeux, souvent riche en matériaux argileux à l'abri de touffes en forme de coussinets de végétaux chamaephytes ou nanophanérophytes, comme c'est souvent le cas avec les nebkhas à *Ziziphus lotus*.



Fig. 22 : une nebkha avec ses jeunes pistachiers de l'Atlas (flèches) entre les touffes du jujubier dans la daya d'el Mergueb (Mars 2008). (Photo : Limane).

#### 2.2.4. Hydrographie

D'après Kaabache (2003), au sein de la réserve, le réseau hydrographique de faible importance est organisé en système endoréique. Les divers oueds correspondent à des cours d'eau temporaires à écoulement principal sous forme de crue et dont le lit caillouteux et encaissé correspond habituellement au substrat rocheux. Ce réseau traverse le territoire de la

réserve (comme par exemple Oued Rekab et Oued el Guersa) et se déverse dans des dépressions prenant souvent l'allure de vastes plaines.

### **2.2.5. Sols**

Toujours selon Kaabache (2003), les principaux types de sols répertoriés, peuvent être définis et caractérisés en fonction des unités géologiques et géomorphologiques précédemment mentionnées.

- Au niveau des djebels, kefs et dalaat se rencontrent, selon la roche-mère, deux grandes catégories de sols : d'une part, des lithosols et rendzines développés sur un substrat dur (calcaire, grés) et d'autre part, des régosols et des sols bruns calcaires constitués sur un substrat tendre (marne, marno-calcaire).

- Sur les glacis à encroûtement calcaro-gypseux se développent des sols calcimagnésiques xériques à croûte calcaire, peu évolués caractéristiques de l'ensemble des parcours steppiques, liés soit à l'étage bioclimatique méditerranéen aride (parcours à alfa, à armoise blanche et sparte), soit à l'étage bioclimatique saharien (parcours à remth).

- Les faidh (zones d'épandage des eaux) et les dayas se caractérisent par la présence de deux types de sols :

- ✓ les siérozems profonds, à structure nette et où domine une texture moyenne et les sols d'apport alluvial, plus ou moins récents, à texture limono-argileuse ;

- ✓ les accumulations sableuses sous forme de micro-dunes et de placage sableux, correspondent à des sols minéraux bruts, d'apport éolien.

### **2.2.6. Composition floristique**

Selon Kaabache (2003), les 211 espèces recensées appartiennent aux 38 familles botaniques suivantes:

Anacardiaceae, Apiaceae, Asclepiadaceae, Asteraceae, Boraginaceae, Brassicaceae, Cappariaceae, Caryophyllaceae, Chenopodiaceae, Cistaceae, Convolvulaceae, Cupressaceae, Dipsacaceae, Euphorbiaceae, Fabaceae, Fumariaceae, Geraniaceae, Iridaceae, Lamiaceae, Liliaceae, Malvaceae, Papaveraceae, Pinaceae, Plantaginaceae, Plumbaginaceae, Poaceae, Polygonaceae, Primulaceae, Ranunculaceae, Resedaceae, Rhamnaceae, Rubiaceae, Scrofulariaceae, Thymelaeaceae, Valerianaceae et Zygophyllaceae.

Rapportées aux 123 familles botaniques de l'ensemble de la flore de l'Algérie, la réserve renferme près de 31% de ces familles. L'examen de la répartition des 211 espèces sur l'ensemble des 38 familles autorise à faire les observations suivantes :

- les familles les plus représentatives en nombre d'espèces sont les suivantes : Apiaceae (10 espèces), Asteraceae (30 espèces), Brassicaceae (24 espèces), Fabaceae (16 espèces), Poaceae (33 espèces) ;

- à elles seules, ces 5 familles représentent 113 espèces, soit 53% de la richesse floristique de la réserve ;

- ces espèces sont réparties sur 150 genres botaniques, parmi lesquels 52 sont représentés au sein des 5 familles déjà citées.

### 2.3. Station de Lekhneg (wilaya de Laghouat)

#### 2.3.1. Situation géographique

Notre station d'étude (daya de Lekhneg) est située dans l'une des communes de la wilaya de Laghouat, portant le même nom (commune de Lekhneg) (Fig. 23). Elle possède les coordonnées GPS suivantes : 33°41'400"N / 2°39'761"E / alt. 837 m.

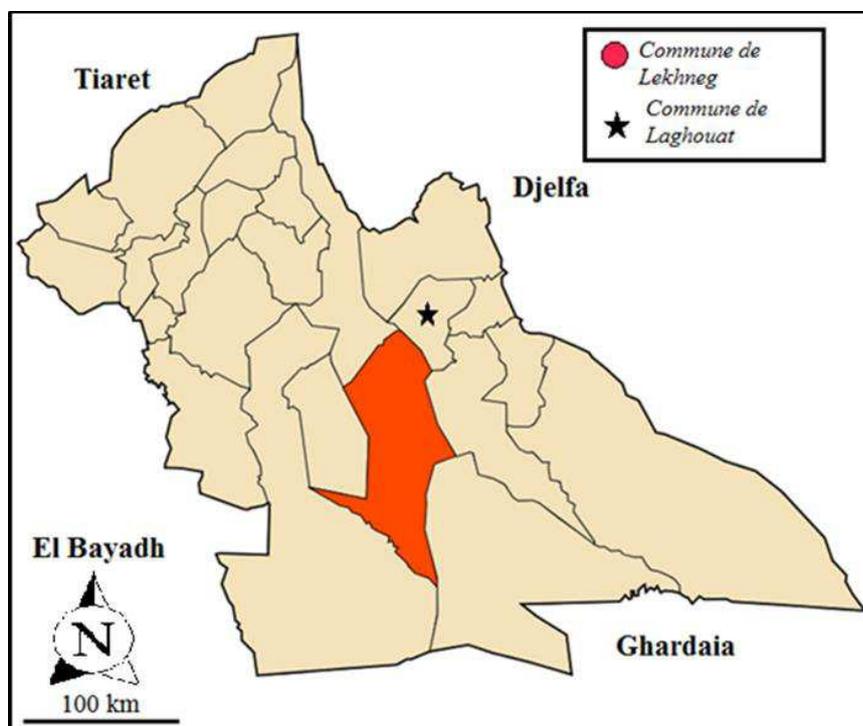


Fig. 23: localisation de la commune de Lekhneg au sein de la wilaya de Laghouat

(Source : Wikimedia.org, 2015).

La wilaya de Laghouat est située dans la partie méridionale des Hauts Plateaux, située au piémont de l'Atlas Saharien du côté nord et s'étendant sur le plateau saharien du côté sud. De nature mixte entre les hautes et les basses terres, Laghouat constitue ainsi une zone tampon reliant le nord et le sud du pays (Anonyme 1, 1995).

La région de Laghouat est éloignée de la capitale Alger de 400 Km. Occupant la latitude nord de 33° 48' et la longitude est de 02°35', elle culmine à 752 m d'altitude. La wilaya est constituée de trois zones (Anonyme 2, 2010) :

- une zone nord constituée par les Hautes Plaines Steppiques agro-pastorales de superficie totale égale à 464.500 ha ;
- une zone centrale de piémonts et montagnes agro-sylvo-pastorales ;
- une zone du plateau saharien au sud de la wilaya.

### 2.3.2. Géologie

La région de Laghouat se subdivise en deux domaines différents par leur tectonique et leur structure (Hannachi, 1981) :

- L'Atlasique saharien au Nord
- Le saharien au Sud

**a.** L'Atlas saharien du cercle de Laghouat : Il est formé par une succession de synclinaux et d'anticlinaux de direction générale SW-NE. Les synclinaux sont caractérisés par leurs corniches calcaires qui ressortent très nettement dans le paysage. Le cœur des anticlinaux est albien (ou continental intercalaire). Seul le cœur du Djebel Azereg est jurassique calcaire.

**b.** La flexure Sud Atlasique : Elle correspond à une limite naturelle (constituée essentiellement par du Turonien calcaréo-dolomitique et un Cénomaniens à dominante marneuse) séparant le domaine saharien du domaine atlasique. Elle est matérialisée par les reliefs que forment le Kef Seridja, l'El Mabad et le Rocher de chiens. Les couches crétacées à cet endroit, plongent à la verticale.

**c.** Le domaine saharien : Au sud de l'Atlas saharien, le pays des Dayas se présente morphologiquement comme de grandes étendues moi-pliocènes, où existent des dépressions peu profondes occupées par une pellicule de limon provenant du lessivage des berges.

Entre l'Atlas et le Sahara existe une gouttière collectant les eaux des Monts des Ouled Nail, des ruissellements du Moi-Pliocène, lors de fortes pluies, et périodiquement les crues de l'oued M'Zi.

Au niveau de la flexure, les couches crétacées plongent à la verticale pour réapparaître au Sud et former le Chebka du M'Zab.

Les résultats des travaux géophysiques, de forages exécutés dans la région montrent que les épaisseurs du Moi-Pliocène sont importantes dans la vallée de l'Oued M'Zi. Il existe près de la flexure sud-atlasique une gouttière pré-saharienne où se sont accumulés d'importants dépôts moi-pliocènes.

### 2.3.3. Caractéristiques hydrogéologiques des diverses formations à Laghouat

Selon Hannachi (1981), nous distinguons :

- a. L'Albien : est ici essentiellement détritique, gréseux. Il est assez fracturé. Les intercalations d'argiles sont importantes à la base et au sommet ; elles délimitent un ensemble aquifère pouvant donner de gros débits.
- b. Le Cénomaniens : est formé de marno-calcaires, de marnes et de calcaires.
- c. Le Turonien : est essentiellement calcaréo-dolomitique. Il se présente souvent en gros bancs et peut contenir de l'eau dans ses fissures.
- d. Le Sénonien : est caractérisé par des dépôts lagunaires (marneux, gypseux et calcaires sublithographiques) absolument imperméables.
- e. Le Mio-Pliocène : est détritique (argile, sable, grès et calcaire). Les données de forages du sillon préatlasique ont montré qu'il mérite une grande attention et se présente comme un bon aquifère.
- f. Les alluvions Quaternaires : le nombre impressionnant de puits inventoriés en 1978 souligne l'intérêt hydrogéologique de ces dépôts. Ils sont formés de galets, de sables et de graviers.

### 2.3.4. Phytosociologie

Les précipitations de l'ordre de 100 mm par an et la très faible pente nord-sud puissamment encroûtée, réduit sa végétation à une steppe claire quasiment monospécifique d'*Arthrophytum scoparium*. A un réseau d'écoulement superficiel peu accentué à demi effacé s'est substitué une multitude de dayas, qui, recueillent les eaux de ruissellement et les alluvions (Monjauze, 1968 et 1980).

Ces petites cuvettes où s'accumulent les eaux de ruissellement, qui peuvent se maintenir quelques jours à plusieurs semaines, favorisent une végétation colonisatrice arborée : le pistachier de l'Atlas et arbustive : le jujubier sauvage ; ainsi que les espèces végétales adaptées à la texture et au régime de submersion temporaire. Cette végétation offre aux dayas un effet oasis faisant d'elles un refuge d'une biodiversité importante (Pouget, 1980a) (Fig. 24 et Fig. 25).



Fig. 24: image satellite de la population de pistachier de l'Atlas échantillonnée dans la daya de Lekhneg (flèche) (Source : Google earth, 2015).

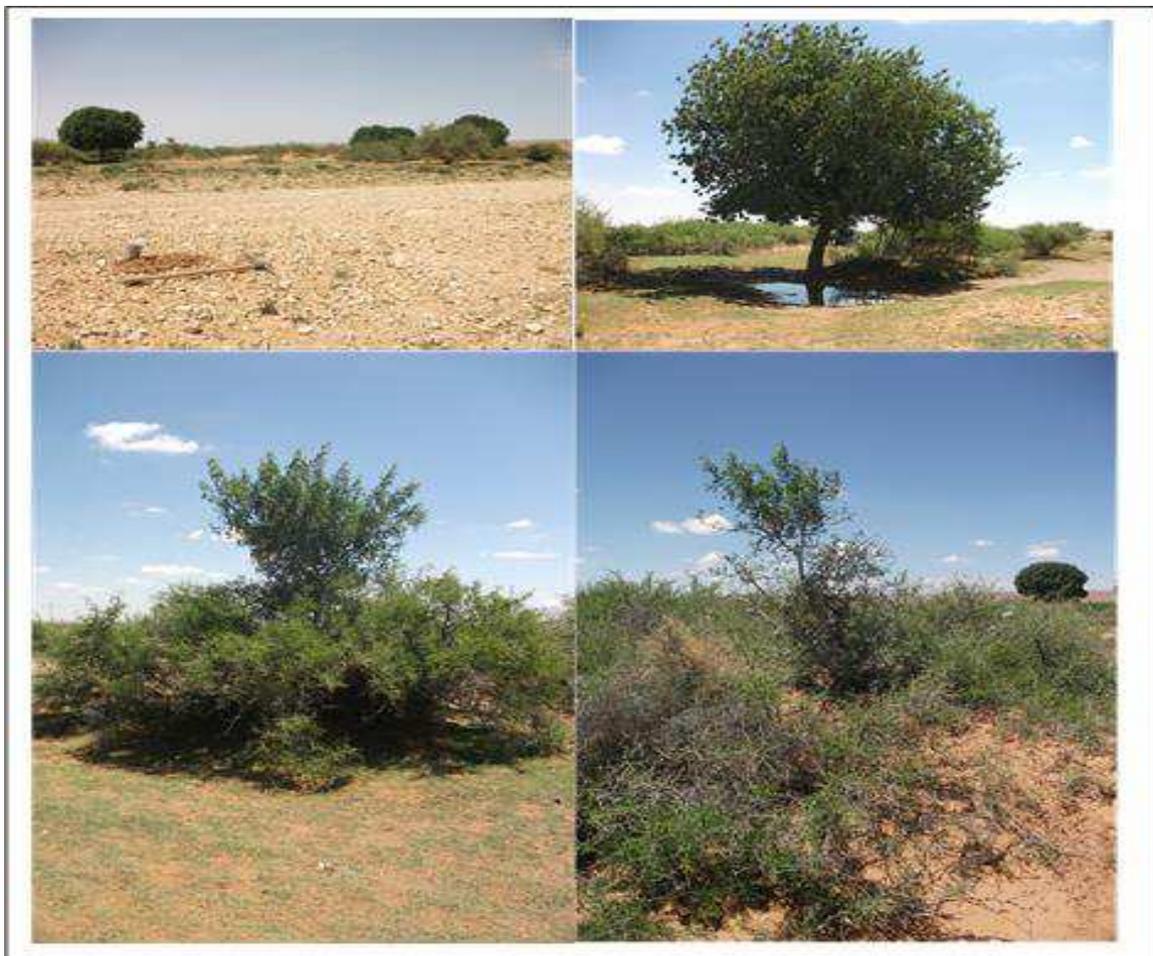


Fig. 25: vues de l'intérieur de la daya à *Pistacia atlantica* et *Ziziphus lotus* de Lekhneg (Avril 2011) (Photos : Limane).

## 2.4. Station de Béni Ounif (wilaya de Béchar)

### 2.4.1. Situation géographique

La population de pistachier de l'Atlas échantillonnée est située dans la commune de Béni Ounif, une des communes de la wilaya de Béchar (Fig. 26), dans la région de la Saoura. Elle possède les coordonnées GPS suivantes :  $31^{\circ}48'728''N / 1^{\circ}44'871''E$  / alt. 760 m.

Béni Ounif est à 110 km au nord-est de la commune de Béchar (chef-lieu de la wilaya), et à 835 km d'Alger. Cette population occupe la latitude nord  $33^{\circ}41'400''$  et la longitude est  $2^{\circ}39'761''$ , à 837 m d'altitude. La majorité des individus y suivent spontanément le réseau hydrographique de la région (Fig. 27 et Fig. 28).

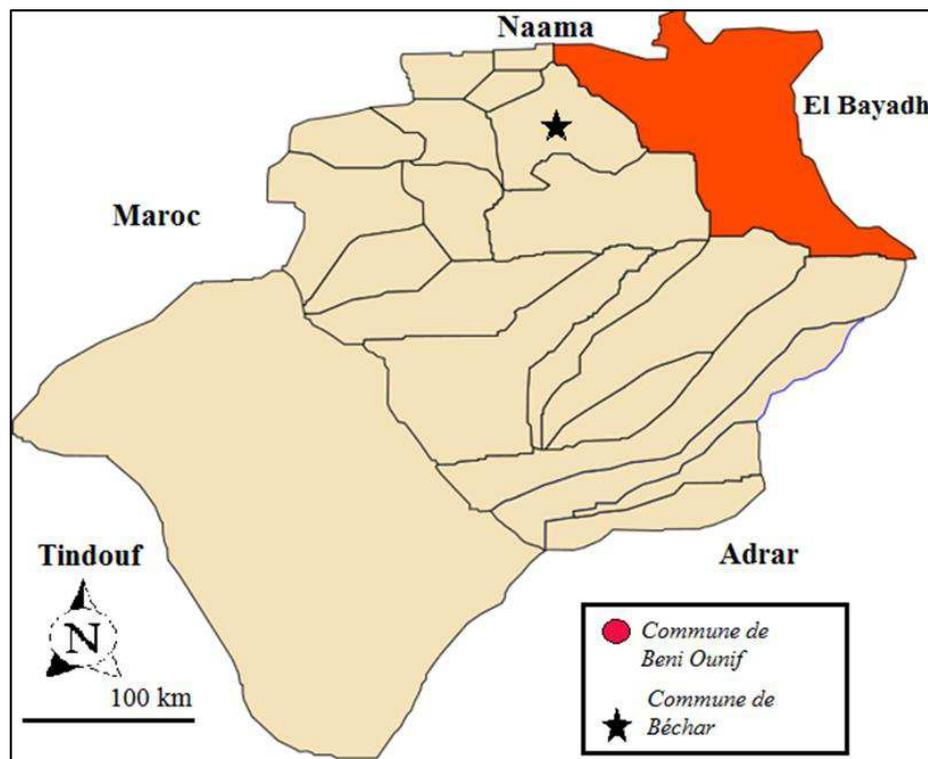


Fig. 26: localisation de la commune de Béni Ounif au sein de la wilaya de Béchar

(Source : Wikimedia.org, 2015).

### 2.4.2. Géomorphologie

Selon Gautier (1905), Beni Ounif est dans une grande vallée, large de 4 km, taillée dans les grès néocomiens par l'érosion d'un fleuve quaternaire. Au fond de cette vallée, sur l'emplacement même de Beni Ounif, au pied du Ksar, on voit des dépôts marneux puissants de quelques mètres, et qui attestent évidemment une sédimentation paisible de vase à éléments très fins.



Fig. 27: image satellite d'une partie de la population de pistachier de l'Atlas (flèche) suivant le réseau hydrographique de la station de Béni Ounif (Source : Google earth, 2015).

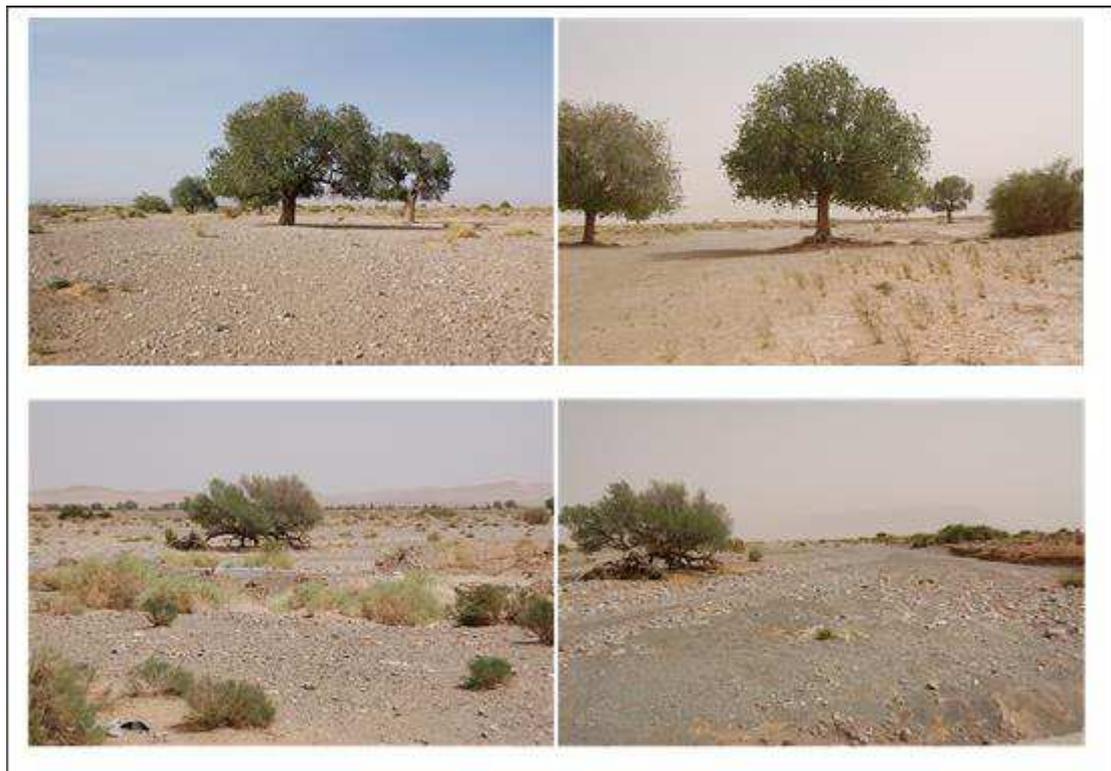


Fig. 28: vues de l'intérieur de la population de pistachier de l'Atlas de la station de Béni Ounif montrant une pseudo-steppe à *Tamarix gallica* et *Hammada scoparia* sur lit d'oued faiblement encaissé. (Mars 2010) (Photos : Limane).

Au contraire, sur la terrasse qui borde la vallée au sud (Garet el Hamir), à une altitude supérieure d'une dizaine de mètres au fond de ma vallée, on voit les grès néocomiens recouverts sur de grands espaces par un cailloutis chaotique de gros galets provenant évidemment du Grouz ; et voilà qui suppose un régime torrentiel et violent de sédimentation. Il n'y a pas d'hésitation possible sur l'âge respectif de ces sédiments si différents. Les marnes blanches du fond de la vallée sont nécessairement plus récentes ; elles sont quaternaires. Le cailloutis des terrasses, de par sa situation même, est évidemment plus ancien ; il est pliocène. Au reste, l'aspect de ces sédiments cadre bien avec ce que nous savons des climats quaternaire et pliocène. Les marnes de Beni Ounif ont un aspect de dépôt lacustre, un lambeau de sédiments analogues à Ben Zireg contient même un petit lit de tourbe ; tout cela suppose évidemment un climat plus humide que l'actuel. Le Pliocène d'autre part, dans tout le nord du Sahara, se présente avec les mêmes caractères, un cailloutis, parfois consolidé en poudingue ; les géologues admettent que c'était une époque de climat désertique, analogue à celui du Sahara contemporain. En effet, les traînées de galets que les oueds actuels déposent au pied du Grouz ne se distinguent pas par leur aspect du cailloutis pliocène. En résumé, nous aurions donc des dépôts quaternaires, fins, argilo-marneux, parfois tourbeux, dépôts d'une époque où l'eau séjournait et s'étalait ; et d'autre part des dépôts pliocènes, accumulations de gros galets, cailloutis parfois transformés en banc de poudingue, dépôts d'une époque où, comme aujourd'hui, entre les intervalles d'orages brefs et terribles, un climat très sec favorisait la formation de croûtes travertineuses.

### **2.4.3. Hydrographie**

Le Sahara est généralement constitué d'un circuit fermé au niveau de la circulation des flux hydriques et présente un réseau hydrologique de type endoréique.

Les ressources hydriques dans la zone d'étude sont représentées par Roche (1973) :

- nappe phréatique du Grand Erg Occidental à l'ouest de l'oued Saoura ;
- nappe libre dans les terrains Quaternaire de la Hamada du Guir à l'Ouest ;
- trois unités aquifères et quelques points d'eau dans les monts d'Ougarta.

Occasionnellement, les crues des oueds de la région de l'Ougarta peuvent constituer un apport hydrique supplémentaire non négligeable pour la végétation. La Saoura connaît des crues plus régulières.

### **2.4.4. Pédologie**

Les sols sahariens, dans leur majorité sont le résultat d'une intense érosion éolienne et/ou hydrique. Les processus chimiques d'altération des roches et des minéraux y sont très

peu développés. Les matériaux originels ainsi formés ne sont cependant pas immuables, car ils subissent essentiellement des actions mécaniques, telles que le brassage par le vent (Aubert, 1962). Il en résulte des profils pédologiques très peu développés, voire inexistantes et qui sont caractérisés par des sols squelettiques, dont la teneur en matière organique est très faible (Ozenda, 2004).

Dutil (1971) classe ces sols en trois principaux groupes :

- sols peu différenciés : ce sont des sols perméables, à percolation rapide, résultant d'une faible pédogenèse ;
- sols halomorphes : ce sont des sols salés plus ou moins perméables, accentués par une forte évaporation, rencontrés généralement dans les dépressions privées de drainage ;
- sols minéraux bruts : deux types de sols sont distingués :
  - ✓ sols d'ablation : sols caractérisés par leur appauvrissement en éléments fins entraînés par le vent en surface ; leur texture plus ou moins sablo-limoneuse est souvent enrichie en sels et en calcaire ou en gypse, formant ainsi une pellicule légèrement durcie ;
  - ✓ sols d'apport : sols dont l'action éolienne a provoqué l'accumulation plus ou moins importante d'éléments sableux (surtout sables moyens et sables fins) en certains points ; les sols minéraux bruts d'apport constituent le type de sol le plus souvent rencontré dans les oueds.

#### **2.4.5. Flore saharienne**

Les rudes conditions du milieu et la position géographique du Sahara ont pour conséquence une flore très particulière caractérisée notamment par sa grande pauvreté. En effet, la flore saharienne comporte environ 1200 espèces d'Angiospermes pour une superficie de 9 millions de km<sup>2</sup> (Ozenda, 2004). De plus, elle réunit des éléments phytogéographiques de différentes provenances. Avec 50%, l'élément saharo-arabique domine et auxquels s'ajoutent, selon les régions, les éléments méditerranéens et tropicaux. Le taux d'endémisme saharien est de 25%.

Concernant la représentation des différentes familles, il n'existe pas de groupes systématiques caractéristiques au-dessus du genre. Il y a absence de familles caractérisant la région saharienne. Les Astéracées, les Fabacées et les Poacées sont les trois familles les plus importantes, et constituent à elles seules 35 à 40% de la flore. Les autres familles remarquables sont d'une part les Brassicacées, les Caryophyllacées et les Lamiacées, d'origine méditerranéenne, et d'autre part les Asclépiadacées, les Capparidacées d'origine tropicale. Notons que les Chenopodiacees sont très souvent indicatrices de sols salés. Enfin,

les Zygothylacées sont représentées par deux genres dans le Sahara que sont *Fagonia* et *Zygothylum* (Wickens, 1984).

### 3. Synthèse climatique

#### 3.1. Méthodologie

Les données climatiques nous ont été fournies par l'Office National de Météorologie (ONM, Alger). La station de Laghouat n'étant pas disponible, nous avons considéré par défaut les données de la station la plus proche de celle-ci, en l'occurrence, celle de Hassi R'mel. L'ONM a mis à notre disposition dix années de données (1995-2004) pour toutes les stations, sauf celle de Hassi R'mel à qui il manquait les données de l'année 2002 (Tableau 1).

Le logiciel Cropwat (FAO, 2009) (basée sur la méthode de Penman-Monteith), nous a permis de calculer le Potentiel d'Evapotranspiration (ETP) (mm/mois) de chaque station, en utilisant les données météorologiques suivantes: températures maximales (°C), températures minimales (°C), vitesse du vent (m/s) et la durée d'ensoleillement (hr) (ONM, Alger). Les valeurs obtenues (Tableau 4) nous ont permis de calculer les indices d'aridité (IA) (UNEP, 1992) et d'établir la zonation éoclimatique selon la méthode de Le Houérou (1995) pour chaque station.

#### 3.1.1 Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen (1953)

Ce diagramme climatique représente les variations mensuelles des températures et des précipitations selon des graduations standardisées : une graduation de l'échelle des précipitations correspond à deux graduations de l'échelle des températures ( $P = 2T$ ). Ses auteurs considèrent qu'un mois est sec quand le total des précipitations (P en mm) est inférieur au double des températures (T en °C), donc quand le rapport :  $P/T \leq 2$

#### 3.1.2. Quotient pluviothermique et climagramme d'Emberger (1955)

Ce quotient est spécifique au climat méditerranéen et est plus fréquemment utilisé en Afrique du Nord. En effet, ce climat présente plusieurs variantes, et pour distinguer ces dernières, trois facteurs importants sont pris en considération par Emberger : la pluviométrie annuelle (P en mm), la moyenne des températures du mois le plus chaud (M en °K) et, la moyenne des températures du mois le plus frais (m en °K). Grâce à ces données, on peut calculer ce quotient suivant la formule :

$$Q_2 = 2000P/(M^2 - m^2)$$

Cette formule développée s'écrit :

$$Q_2 = 1000P / [((M+m)/2)(M-m)],$$

la valeur  $((M+m)/2)$  du fait de son expression en °K varie peu, Stewart (1968) (In Le Houérou, 1995), l'assimile à une constante relative à la région  $K=3,43$  (Algérie et Maroc), d'où le quotient :

$$Q_3 = 3,43P / (M-m)$$

Tableau 1 : températures et pluviométries des stations étudiées (ONM, Alger).

Stations et période	Médéa (1995-2004)			M'sila (1995-2004)		
	m (°C)	M (°C)	P (mm/mois)	m (°C)	M (°C)	P (mm/mois)
Janvier	<b>4.4</b>	<b>19.3</b>	<b>106.9</b>	<b>3.8</b>	<b>13.9</b>	24.54
Février	5.1	21.2	71.1	4.7	16.7	8.15
Mars	7.2	28.0	44.5	8.0	20.6	14.96
Avril	8.5	29.2	67.9	10.9	23.4	20.89
Mai	12.8	35.5	45.7	16.2	28.8	27.21
Juin	18.4	37.6	6.5	21.4	35.1	9.16
Juillet	21.1	<b>39.6</b>	<b>3</b>	<b>24.8</b>	<b>38.4</b>	<b>1.48</b>
Août	<b>21.3</b>	39.0	10.2	24.2	37.7	10.09
Septembre	16.7	37.5	28	19.2	31.5	<b>32.12</b>
Octobre	13.6	32.0	45.9	14.6	26.2	22.47
Novembre	7.9	22.2	97.1	8.3	18.8	19.12
Décembre	5.5	19.6	100.7	5.1	14.6	24.84
<b>Moyennes</b>	11.9	30.1	52.29	13.4	25.5	17.92
<b>Cumuls</b>	-	-	<b>627.5</b>	-	-	<b>215.03</b>
Stations et période	Hassi R'mel (1995-2001/2003-2004)			Béchar (1995/2004)		
	m (°C)	M (°C)	P (mm/mois)	m (°C)	M (°C)	P (mm/mois)
Janvier	<b>3.2</b>	14.8	<b>27.5</b>	<b>3.8</b>	<b>16.9</b>	6.05
Février	4.7	16.9	1.6	5.8	19.3	7.5
Mars	7.9	21.2	8.9	10.2	23.2	<b>9.5</b>
Avril	11.1	24.7	20.6	14.1	26.6	8
Mai	15.0	28.8	1.9	18.5	31.3	4.4
Juin	21.4	35.1	5.5	24.2	37.0	5.8
Juillet	<b>24.9</b>	<b>39.1</b>	<b>1.2</b>	<b>27.4</b>	<b>40.8</b>	<b>0.8</b>
Août	24.4	38.5	8.6	26.7	39.4	4.6
Septembre	18.9	32.3	8.7	21.9	34.6	8
Octobre	16.4	28.2	18.1	16.1	28.3	7.8
Novembre	6.9	18.2	11.5	9.0	21.6	4.2
Décembre	4.0	<b>14.0</b>	17.8	4.8	17.4	9.1
<b>Moyennes</b>	13.2	26.0	10.99	15.2	28.0	6.31
<b>Cumuls</b>	-	-	<b>131.9</b>	-	-	<b>75.75</b>

**M** : moyennes mensuelles des températures maximales (°C) ; **m** : moyennes mensuelles des températures minimales (°C) ; **P** : pluviométrie mensuelle moyenne (mm/mois).

où : **3.43**: Constante relative à la région Algérie-Maroc ; **P** : pluviométrie moyenne annuelle en mm; **M** : Moyenne des températures maximales du mois le plus chaud (en °C) ; **m** : Moyenne des températures minimales du mois le plus froid (en °C). Le climat est d'autant plus sec que la valeur de ce quotient est faible.

### 3.1.3. Indice d'aridité (UNEP, 1992)

C'est un indicateur du degré d'aridité du climat à un endroit donné par rapport à la demande évaporative de l'atmosphère. Il est défini comme suit :

$$IA = P/ETP$$

(**P** : précipitation annuelle moyenne en mm; **ETP**: évapotranspiration potentielle annuelle moyenne en mm.)

Cet indice est largement utilisé pour l'évaluation de la qualité du climat et traduit le déficit annuel entre la quantité des précipitations reçue (P) par rapport à la demande évaporative de l'atmosphère (ETP), ce qui implique que plus l'indice est faible plus l'aridité est élevée et permet de classer les climats de l'hyperaride à l'humide (Tableau 2).

Tableau 2 : indices d'aridité (IA) et zonations éoclimatiques correspondantes (UNEP, 1992).

Zonation	Valeurs de IA	Zonation	Valeurs de IA
Hyperaride	IA < 0,05	Aride	0,05 < IA < 0,20
Semi-aride	0,21 < IA < 0,50	Sub-humide sec	0,51 < IA < 0,65
Sub-humide et humide	IA > 0,65		

### 3.1.4. Zonation éoclimatique selon la méthode de Le Houérou (1995)

Le Houérou (1995) a dressé une zonation éoclimatique des régions de l'Afrique du Nord, en portant :

- sur les ordonnées le quotient pluvio-évapotranspiratoire  $[P/ETPp]$  où ETPp est l'évapotranspiration calculée à partir de la formule de Penman :

$$ETPp = [(M+m)/2] \times 68,64$$

- et sur les abscisses les moyennes des températures minimales du mois le plus froid (m).

Il proposa ainsi les zonalités éoclimatiques données dans le tableau 3.

Tableau 3 : zonalités écoclimatiques proposées par Le Houérou (1995).

Zonalité écoclimatique	Intervalles de P/ETPp× 100
Zone semi-aride	28 < P/ETPp× 100 < 45
Zone aride <i>stricto sensu</i>	6.5 < P/ETPp× 100 < 28
Zone hyperaride	P/ETPp× 100 < 6.5

### 3.2. Résultats

Nous constatons que nos stations sont assez disparates dans la quantité d'eau qu'elles reçoivent dans l'année (Tableau 1). Médéa, la plus septentrionale du transect choisis, reçoit 627.5 mm de pluie par an, puis M'sila avec ses 215.03 mm, puis Hassi R'mel avec ses 131.9 mm et enfin Béchar, la plus méridionale du transect est la plus aride avec à peine 75.75 mm de pluie par an.

Les diagrammes ombrothermique des stations (Fig. 29) montrent un allongement rapide de la saison sèche selon le gradient considéré, passant de 4 mois à Médéa, à 10 mois à M'sila, puis à 11 mois à Hassi R'mel et enfin à 12 mois de saison sèche à Béchar.

Les moyennes mensuelles du potentiel d'évapotranspiration (ETP) de chaque station, calculées par le biais du logiciel Cropwat (FAO, 2009) sont illustrées par le tableau 4 :

Tableau 4 : moyennes mensuelles du Potentiel d'Evapotranspiration (ETP) de chaque station (calculées par le biais du logiciel Cropwat (FAO, 2009)).

Stations mois	ETP (mm/mois)			
	Médéa (1995-2004)	M'sila (1995-2004)	Hassi R'mel (1995-2001/2003-2004)	Béchar (1995/2004)
Janvier	49.83	51.69	77.17	83.39
Février	62.45	62.63	90.81	98.65
Mars	116.39	105.42	148.13	161.5
Avril	139.06	134.06	195.25	212.51
Mai	180.66	173.88	253.76	271.37
Juin	213.77	213.39	282.88	301.67
Juillet	229.22	233.52	309.96	323.52
Août	209.97	218.19	294.13	302.7
Septembre	165.56	156.62	212.62	233.77
Octobre	119.12	111.9	160.95	190.89
Novembre	63.46	66.35	76.73	108.02
Décembre	47.89	46.21	65.64	77.58
<b>Moyennes</b>	<b>133.115</b>	<b>131.155</b>	<b>180.67</b>	<b>197.13</b>

Elles ont permis de calculer les indices d'aridité selon la méthode de l'UNEP (1992) (Tableau 5). Ces résultats montrent une nette augmentation de l'aridité selon le transect, allant (selon la classification proposée) du semi-aride pour Médéa (IA = 0.39), à l'hyper aride pour Béchar (IA = 0.03) en passant par M'sila (IA = 0.14) et Hassi R'mel (IA = 0.05) toutes deux classées zones arides.

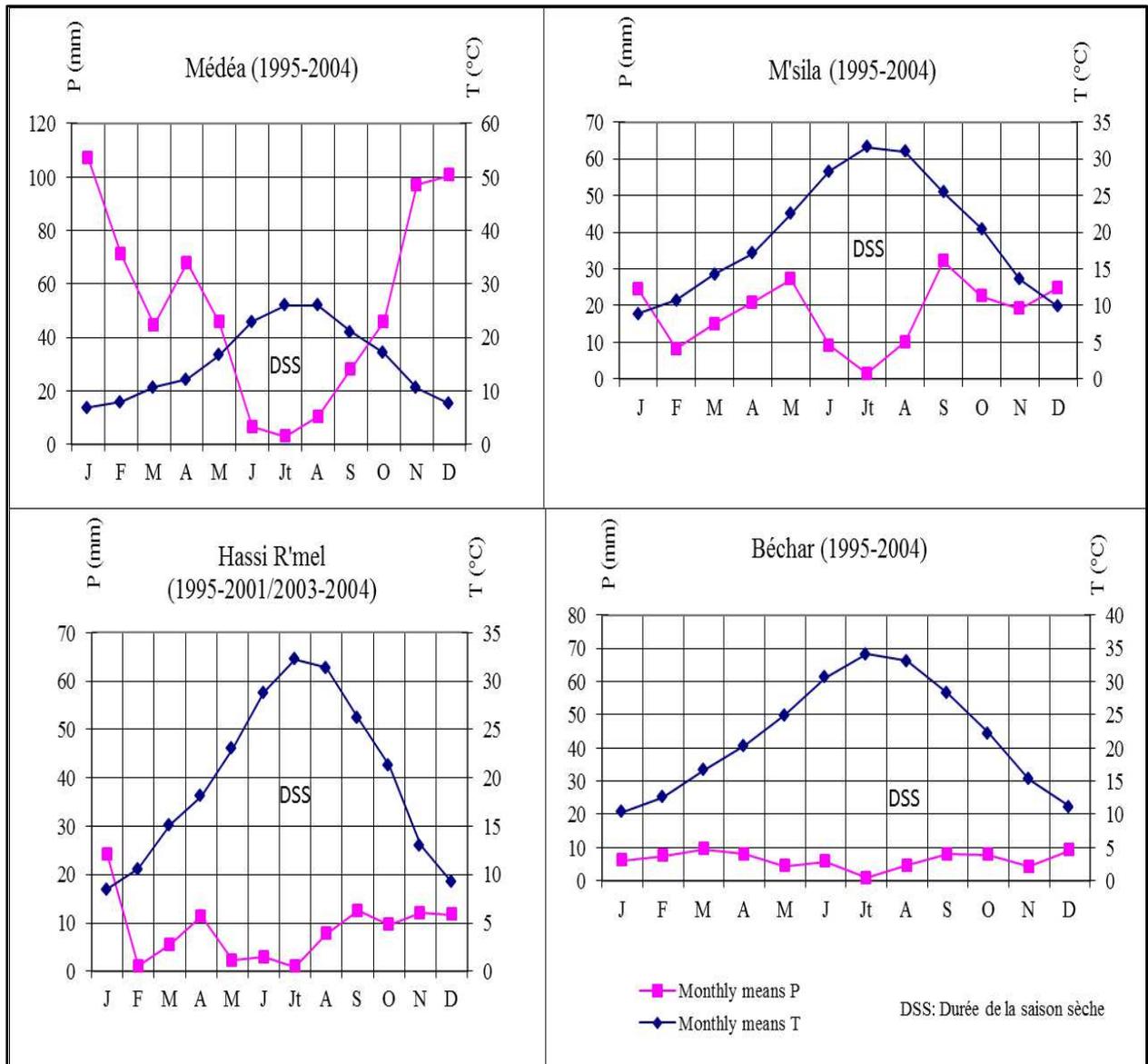


Fig. 29: diagrammes ombrothermique de Bagnouls et Gausson (1953) des quatre stations.

Les quotients pluviothermiques calculés (Tableau 5) décalent relativement nos stations sur le climagramme d'Emberger (Fig. 30), mais néanmoins montrent la même tendance des stations à se situer selon le même ordre, sur un gradient d'aridité croissante.

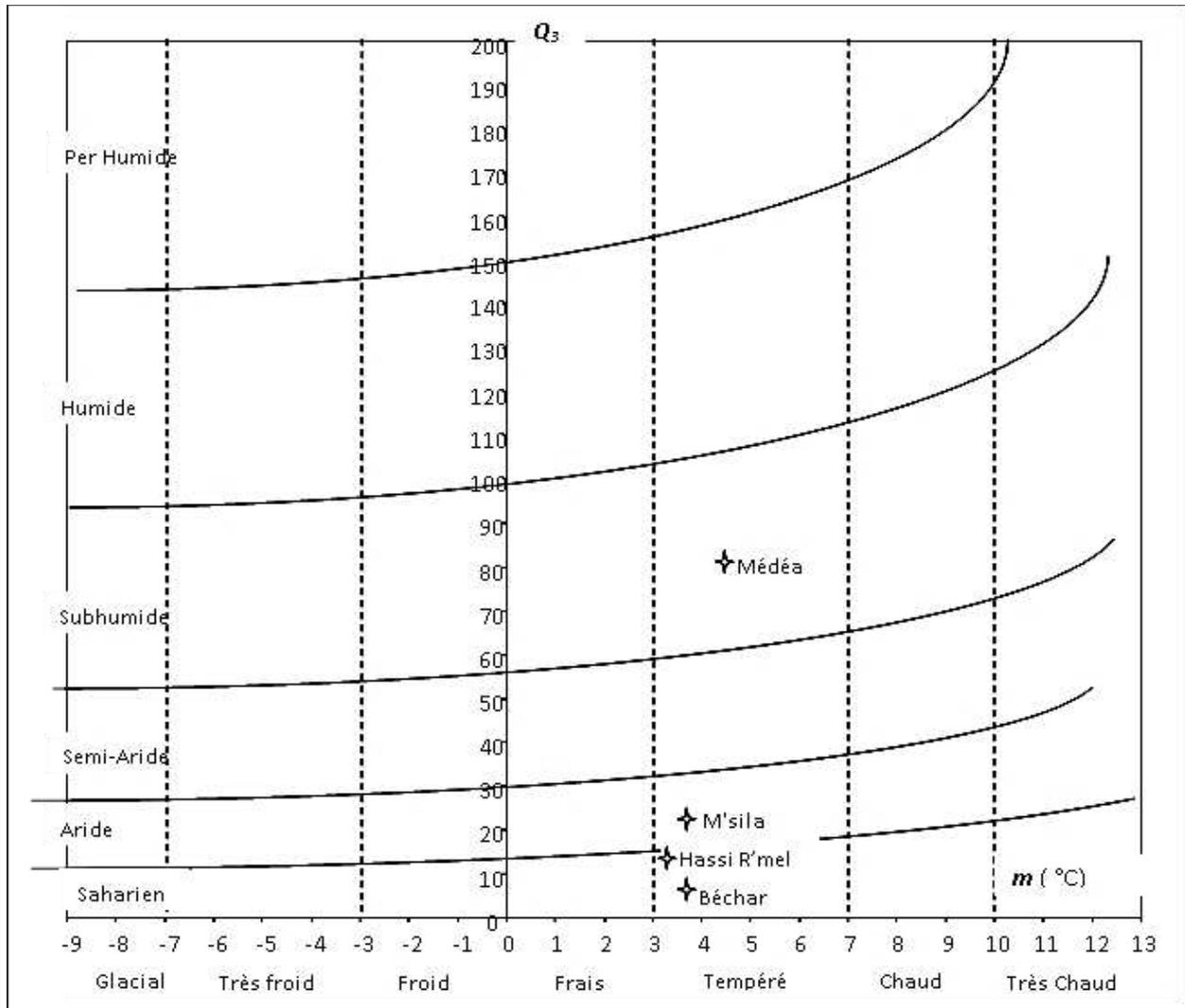


Fig. 30: situation des stations dans le climagramme d'Emberger.

Les résultats obtenus selon la méthode de Le Houérou (1995) (Tableau 6) confirment que nos quatre stations suivent un gradient d'aridité croissante, allant de la plus septentrionale (Médéa) qui se situe dans le subhumide avec un rapport P/ETP de 0.52, vers la plus méridionale (Béchar) classée zone hyperaride avec un très faible rapport P/ETP de 0.05. Les stations de M'sila et Hassi R'mel toutes deux sont situées en zone aride inférieur avec des rapports P/ETP respectifs de 0.15 et 0.09 (notons que Hassi R'mel étant relativement plus aride que M'sila).

Tableau 5 : synthèse des principales caractéristiques climatiques des stations étudiées.

Stations	P (mm/an)	Températures (°C)			ETP (mm/an)	IA (UNEP, 1992)	Zonation éoclimatique (UNEP, 1992)	DSS (Mois /an) (Bagnouls et Gaussen, 1953)	Q <sub>3</sub>	Etage bioclimatique (climagramme d'Emberger, 1955)
		Moyennes annuelles des températures (°C)	M (moyennes des maxima du mois le plus chaud) (°C)	m (moyennes des minima du mois le plus froid) (°C)						
Médéa	627.6	15.43	30.9	4.4	1597.38	0.39	Semi-aride	4	81.23	Subhumide tempéré
M'sila	216.42	19.47	38.4	3.8	1573.86	0.14	Aride	10	21.45	Aride tempéré
Hassi R'mel	110.29	19.8	39.1	3.2	2168.03	0.05	Aride	11	12.59	(limite) Arde / Saharien tempéré
Béchar	75.92	21.62	40.8	3.8	2365.57	0.03	Hyperaride	12	7.04	Saharien tempéré

**P** : moyennes annuelles des précipitations ; **ETP** : potentiel d'évapotranspiration ; **IA** : Indice d'aridité ; **DSS** : durée de la saison sèche ; **Q<sub>3</sub>** : Quotient pluviothermique

Tableau 6 : données et formules utilisées pour la zonation éoclimatique des stations selon la méthode de Le Houérou (1995).

Stations	P (mm)	m (°C)	ETP <sub>p</sub> = [(M+m)/2] ×68,64 (mm)	P/ETP	(P/ETP)×100	Zonation (Le Houérou,1995)
Médéa	627.6	4.4	1211.50	0.52	52	Subhumide à hiver tempéré
M'sila	216.42	3.8	1448.30	0.15	15	Limite aride inférieur à hiver tempéré
Hassi R'mel	131.8	3.2	1451.74	0.09	9	Aride inférieur à hiver tempéré
Béchar	75.92	3.8	1530.67	0.05	5	Hyperaride à hiver tempéré

D'ailleurs, les courbes de tendances et leurs coefficients de corrélations respectifs ( $R^2$ ) des variables climatiques considérées montrent<sup>1</sup> la haute significativité de l'évolution du gradient d'aridité dans le sens croissant (Fig. 31).

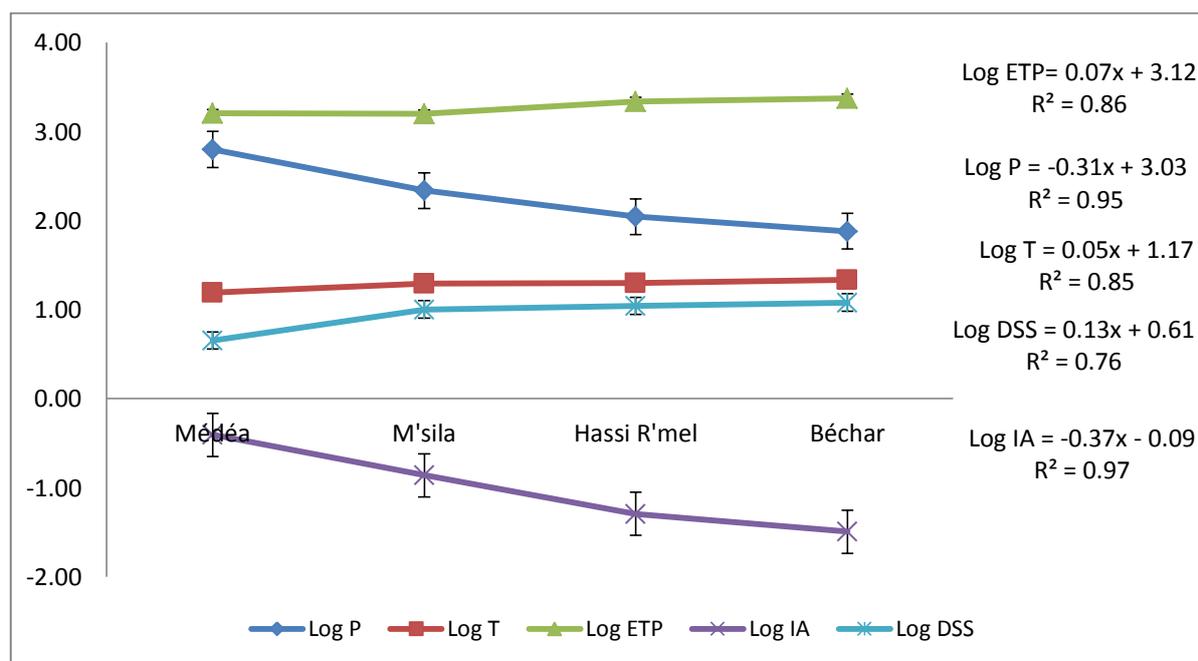


Fig. 31 : courbes de tendances et coefficients de corrélations respectifs des variables climatiques utilisées.

<sup>1</sup> Vu les écarts très importants entre les valeurs de ses différentes variables, nous les avons log-transformés pour une meilleure visibilité.

## 4. Echantillonnage

### 4.1. Caractéristiques des individus échantillonnés et estimation de leurs âges

L'échantillonnage s'est effectué au printemps (à la remontée biologique). Dans chaque station échantillonnée, et à défaut de disposer de tarière de Pressler pour déterminer les âges des arbres, nous avons considéré des critères dendrométriques facilement mesurables (taille<sup>2</sup>, circonférence du tronc et diamètre de la couronne). Nous prenions autant de mâles que de femelles, l'espèce étant dioïque. Nous avons ainsi pu échantillonner un total de 27 individus le long du transect.

Pour choisir parmi les deux critères dendrométriques (circonférences des troncs ou hauteurs des arbres) le plus adéquat pour estimer les âges relatifs des individus échantillonnés, nous les avons testés par des ANOVA respectives. Les résultats sont dans le tableau 7.

Tableau 7: résultats des tests ANOVA appliqués aux populations pour vérifier la significativité des différences des hauteurs et des circonférences des troncs des arbres échantillonnés.

Population	Valeur de $p$ en considérant la Hauteur de l'arbre	Conclusion $H_0/H_1$	Valeurs de $p$ en considérant la circonférence du tronc à 1.20 m du collet	Conclusion $H_0/H_1$
Sidi Naamane	0.0014	$H_1$	8.9419	$H_0$
el Mergueb	0.0027	$H_1$	0.0368	$H_1$
Lekhneg	0.0047	$H_1$	0.008	$H_1$
Béni Ounif	0.0018	$H_1$	0.051	$H_1$

Parmi les deux dimensions considérées, la hauteur des arbres est la plus consensuelle dans la confirmation des différences d'âges entre les individus échantillonnés. En effet, les tests ANOVA montrent que dans les quatre stations, le critère « hauteur des arbres » a présenté les différences les plus significatives. Quant aux circonférences des troncs, l'échantillon de Sidi Naamane ne semble pas montrer cette significativité.

<sup>2</sup> On peut utiliser facilement la technique dite « la croix du bûcheron » (voir annexe 1) si l'on ne dispose pas d'appareil de mesure adéquat.

Cependant, il se trouve que d'entre les trois critères dendrométriques considérés, la circonférence du tronc est la plus complète en termes de données récoltées<sup>3</sup>. De plus, il se trouve que d'après Mitchell (1991), quand un arbre atteint une hauteur maximale et une expansion maximale, il stoppe sa croissance et, après un certain temps, commence à décroître lorsqu'il arrive à l'état sénile. Ni la hauteur, ni l'expansion ne peuvent servir à l'estimation de l'âge, excepté pour les jeunes arbres. Mais la circonférence du tronc de chaque arbre augmente relativement chaque année. L'âge d'un arbre est donc fonction de sa seule circonférence.

Donc nous avons considéré ce critère comme moyen indirect (biaisé) pour l'estimation des âges relatifs de nos individus. Ainsi, la circonférence du tronc de l'arbre est proportionnelle à son âge relatif.

#### **4.2. Echantillonnage des sols et des racines**

Nous avons réalisé des fosses pédologiques d'une profondeur de 80 cm sous chaque sujet échantillonné (pour les détails de la méthode, voir chapitre III, § 3.4 et § 3.5). Leurs largeurs coïncident approximativement avec les limites de la couronne de chaque individu.

Ces fosses répondent à trois objectifs principaux:

1. découvrir unilatéralement le système racinaire de chaque sujet et procéder ainsi à des mesures dendrométriques dans l'optique de l'établissement des architectures racinaires respectives;
2. échantillonner les racines fines de chaque individu en vue de leur étude microscopique ultérieure de détermination des champignons associés;
3. échantillonner les sols en vue de déterminer ultérieurement leurs caractéristiques physiques et chimiques principales.

---

<sup>3</sup> Il manque au sujet BO3 sa hauteur et son diamètre de couronne, en effet son houppier a disparu, et donc nous ne disposons que de la circonférence de son tronc.

Chapitre III

Adaptations des architectures racinaires du pistachier de l'Atlas en fonction du sol sous-jacent.

## Valorisations des travaux

Cette partie a fait l'objet de deux publications internationales et d'une participation orale lors du 1<sup>er</sup> séminaire national sur la sécurité alimentaire (BIOSEC2015).

### Article (Mars 2014)



**TUBITAK**

**Turkish Journal of Botany**  
<http://journals.tubitak.gov.tr/botany/>  
**Research Article**

Turk J Bot  
(2014) 38: 536-549  
© TÜBİTAK  
doi:10.3906/bot-1308-9

---

**Root architecture adaptation of *Pistacia atlantica* subsp. *atlantica* according to an increasing climatic and edaphic gradient: case of a north-south transect in Algeria**

Abdelkrim LIMANE<sup>\*</sup>, Noria SMAIL-SAADOUN, Amel BELKEBIR-BOUKAIS, Karima KISSOUM-HAMDINI  
Natural Resources Laboratory, Department of Plant and Animal Biology, Faculty of Biological Sciences and Agricultural Sciences,  
Mouloud Mammeri University, Tizi-Ouzou, Algeria

---

Received: 05.08.2013 • Accepted: 20.01.2014 • Published Online: 31.03.2014 • Printed: 30.04.2014

### Article (Février 2014)

**academicJournals**

Vol. 9(6), pp. 620-626, 6 February, 2014  
DOI: 10.5897/AJAR2013.7291  
ISSN 1991-637X ©2014 Academic Journals  
<http://www.academicjournals.org/AJAR>

**African Journal of Agricultural  
Research**

*Full Length Research Paper*

**Root architecture of Atlas pistachio in relation to underlying soil properties under arid conditions**

**Limane Abdelkrim<sup>1</sup>, Smail-Saadoun Noria<sup>1</sup> and Thomas Gradziel<sup>2\*</sup>**

<sup>1</sup>Natural Resources Laboratory, Mouloud Mammeri University, 15000 Route de Hasnaoua, Tizi-Ouzou, Algeria.  
<sup>2</sup>Department of Plant Sciences, University of California, Davis, CA, USA.

Accepted 22 January, 2014

Participation orale lors du 1<sup>er</sup> séminaire national sur la sécurité alimentaire (BIOSEC2015).



## **1. Introduction**

Dans les régions arides et semi-arides d'Afrique où les températures élevées et la lumière intense sont au quotidien, l'acquisition de l'eau reste le défi central pour la survie des plantes. Dans d'aussi rudes biotopes, seules les plantes pérennes arrivent à survivre durant les périodes de sécheresse (Birand, 1959).

La plante alloue généralement plus de 40% de ses assimilats carbonés à ses racines (Morot-Gaudry et *al.*, 2009). Par ailleurs, la biomasse allouée au système racinaire augmente progressivement dans les sols arides (Sultan, 2003), augmentant ainsi le ratio racine/tige (Struik and Bray, 1970 ; Bell et *al.*, 1979). Cependant, ce coût élevé en biomasse et en énergie n'est pas en soi suffisant pour la survie de la plante, mais doit en plus être optimisé par une distribution efficace de ses racines, dans l'espace et dans le temps (optimisation de l'architecture racinaire).

Naturellement, les ressources hydrominérales sont distribuées d'une manière hétérogène dans le volume de sol et ne cessent de changer dans le temps. Le système racinaire dans les environnements édaphiques hétérogènes tend à développer des architectures localisées et spécifiques (Nicoll et *al.*, 1997). Ainsi, l'analyse de la distribution spatiale du système racinaire peut être utilisée pour révéler la source des éléments hydrominéraux (Lynch, 1995).

Lors de ce travail, nous avons tenté d'approcher les différentes architectures racinaires développées par des pistachiers de l'Atlas appartenant à quatre populations différentes et qui colonisent respectivement quatre biotopes différents par leurs degrés d'aridité climatique (*cf.* chapitre II), mais aussi édaphique conséquente. Aux résultats bruts obtenus, nous avons soumis deux approches complémentaires. La première (Volet I) est une approche intra-populationnelle. En effet, nous voulions voir comment les systèmes racinaires des individus (l'échantillon) d'une même population répondent aux conditions édaphiques locales auxquelles ils sont soumis. La deuxième approche (Volet II) est inter-populationnelle, par le fait qu'elle consiste en l'intégration des quatre populations et de leurs conditions abiotiques (édaphiques et climatiques), pour constituer une sorte de « métapopulation » et ainsi voir comment sont affectées leurs architectures racinaires le long des gradients climatique et édaphique croissants ainsi obtenus.

## **2. Synthèse bibliographique**

### **2.1. Influence de l'aridité sur les caractéristiques des sols**

Il serait présomptueux de notre part de prétendre décrire toute les variantes et autres spécificités de ces types de sols, mais nous avons tenté de synthétiser celles que nous avons estimé les plus importantes décrites dans ce domaine.

### **2.1.1. Facteurs climatiques et physiques**

D'après Rognon (1994), la sécheresse, si elle n'est pas reconnue comme facteur génétique majeur de l'évolution des sols, participe à bien des titres au « comportement » original des sols des régions sèches, à leur pédogénèse, mais aussi à leur destruction. La sécheresse a été considérée pendant très longtemps comme un frein à la pédogénèse. Aujourd'hui, on met davantage l'accent sur la spécificité des processus chimiques et physiques observés en régions sèches.

Selon Floret et Pontagnier (1984), l'aridité climatique de ces zones peut être accentuée ou atténuée selon les types de sol. Cette aridité climatique est en général appréciée sur la base de la pluviosité moyenne temporelle. A l'échelle de la parcelle, il vaut mieux considérer la pluie « efficace », celle qui après ressuyage du sol, contribue réellement à l'accroissement des réserves hydriques. Par ailleurs, pour une même pluie efficace, la période de végétation est plus ou moins longue selon les caractéristiques physico-hydriques du sol. Par exemple, pour des durées de sécheresse climatique à peu près identiques, les milieux limoneux montrent des durées de sécheresse édaphique pour le végétal 60% plus longues que celle des milieux sableux. En effet, pour une répartition identique de la pluviosité au cours de l'année et pour une même hauteur annuelle des précipitations efficaces, les différents types de sols ne présentent pas les mêmes réactions à l'aridité climatique. C'est ainsi que certains sols permettent au végétal d'avoir une période de végétation plus longue et ceci uniquement en fonction des caractéristiques physico-hydriques de leurs horizons. Le sol agit comme un réservoir de l'eau infiltrée et un régulateur contrôlant la répartition des différents flux (ruissellement, drainage et évapotranspiration).

D'après Rognon (1994), des contraintes physiques dues à des dessiccations répétées au cours du temps semblent jouer un rôle dans les propriétés actuelles de certains sols, ajoutant une dimension temporelle à l'impact de la sécheresse. Sous climat sec, le potentiel hydrique des sols atteint rarement les valeurs caractéristiques de la capacité au champ (pF 1,8 à 3) et plus la teneur en eau diminue dans le sol, plus cette eau est retenue énergiquement sur la surface des pores (effet de succion). Dans ces milieux non saturés, le transport des éléments dissous devient donc de plus en plus discontinu. La lixiviation est surtout freinée au niveau des racines qui forment un horizon « racinaire » de plus en plus important, puisque la prospection de grands volumes de sol devient vitale pour l'alimentation en eau des végétaux.

Selon les caractères physiques ou la position topographique des sols, la réserve utile pour les plantes peut être fortement accrue ou diminuée, encore faut-il que cette réserve puisse être prospectée par les racines (obstacle de la compaction de certains sols). Des expériences ont montré que l'ultra dessiccation pouvait provoquer la formation d'agrégats irréversibles et

un déficit d'hydratation pouvant atteindre 50 à 80% par rapport à l'état initial. De très fortes dessiccations, souvent répétées, diminuent la capacité de rétention en eau des sols, donc accentuent encore les effets de la sécheresse « climatique ». La sécheresse, surtout sous ses formes les plus accusées, peut provoquer soit la prise en masse (battance suite à son tassement), soit la pulvérisation des sols (Rognon, 1994).

En domaine réellement aride, se forment des argiles très originales par leur structure fibreuse, qui sont les polygorskites et les sépiolites. Elles se développent dans les milieux riches en sels magnésiens ou dans les croûtes calcaires à pH élevé. L'apparition et l'accentuation de la sécheresse modifie les processus chimiques et aboutit à des types d'argiles différents ou même spécifiques (Rognon, 1994).

### **2.1.2. Caractéristiques pédogénétiques**

D'après Aubert (1960), la zone aride (au sens large) est caractérisée à la fois par son climat toujours peu pluvieux et parfois très sec et très irrégulier, et par sa végétation herbacée ou frutescente, rarement arborée, très irrégulièrement répartie et constituant un couvert excessivement lâche. Supportant des conditions aussi sévères, ces sols présentent un certain nombre de caractères constants.

#### **a. Evolution lente et profondeur souvent réduite**

Pendant la période sèche prolongée que ces sols supportent, ils sont pratiquement arrêtés dans leur évolution aussi bien minérale qu'organique. Elle ne se produit donc que quelques mois par an ; ils restent ainsi relativement jeunes. Les caractères et propriétés de ces sols jeunes et peu évolués, dépendent essentiellement des points de vue physique et chimique, de la nature de la roche mère. Du point de vue biologique, elle intervient aussi très largement, mais un fait essentiel est la faiblesse et l'irrégularité des pluies et leur caractère concentré dans le temps. Le sol ne reste humide que peu de temps et son évolution biologique est donc très limitée chaque année (Aubert, 1960).

D'après Rognon (1994), en régions sèches, le fonctionnement du sol (redistribution géochimique, activité biologique) est limité au volume de sol humidifié annuellement. Dans les régions plus arides, où l'évaporation prédomine sur l'ensemble de l'année, la sécheresse limite de plus en plus la formation des sols, réduite à l'extrême, à des lithosols ou à des sols salins qui sont à peine des sols au sens classique du terme.

#### **b. Matière organique fortement évoluée, peu abondante et superficielle ou un peu plus abondante et répartie dans l'ensemble du profil**

D'après Pouget (1980b), la teneur en matière organique, sous la dépendance des précipitations, diminue plus ou moins régulièrement avec l'aridité croissante du climat. La

végétation naturelle, pratiquement seule source de matière organique est indispensable à la formation et à l'évolution des sols. Synthétisée au niveau des organes aériens, elle est restituée au sol sous forme de litière ou, par la décomposition sur place du système racinaire. Sous végétation de steppe, la matière organique provient de la décomposition sur place du système racinaire, d'où son incorporation profonde dans le profil (isohumisme).

D'après Rognon (1994), en régions sèches, l'évolution de la matière organique peut aboutir à deux résultats opposés : un stockage prolongé dans l'humus du sol ou une volatilisation très rapide, en fonction de la production de matière végétale et des modifications des processus de formation de l'humus sous l'effet de la sécheresse. Les alternances de saturation en eau et de dessiccation complète des profils si caractéristiques des pédoclimats en régions sèches, favorisent la polymérisation de la matière organique, aboutissant à des humus extrêmement stables.

c. Eléments minéraux assez peu altérés ; éléments solubles concentrés en surface ou partiellement lessivés et accumulés à un niveau ou à un autre du profil, jusqu'à donner naissance à des nodules ou à des croûtes calcaires, gypseuses ou salines

Sur de grandes surfaces des pays arides (piémonts des collines et plateaux du tell, Hauts Plateaux d'Algérie,...), le sol apparaît partiellement constitué ou couvert d'horizons calcaires durcis. Très souvent, il s'agit de formations anciennes que de nouveaux dépôts éoliens, alluviaux ou colluviaux sont venus enterrer. Beaucoup de ces croûtes, friables dans leur masse et durcies en surface, sont dues à un double processus, très longtemps prolongé de lessivage des horizons de surface d'un sol généralement steppique et de remontées capillaires aux dépens de nappes temporaires, ou plus exactement de zones d'engorgement constituées en profondeur par des venues latérales d'eaux ou par la pénétration en profondeur d'eaux de pluie, lors des périodes très pluvieuses qui se produisent irrégulièrement en ces régions (Aubert, 1960).

D'après Pouget (1980b), que ce soit le substratum géologique (roche en place) ou les dépôts secondaires (alluvions, colluvions, dépôts éoliens), la quasi-totalité des matériaux sur lesquels se sont formés et évoluent les sols des zones arides, se caractérise par la présence de calcaire, très souvent aussi de gypse et de sels. Il en résulte des pH basiques, parfois proches de la neutralité et des complexes absorbants saturés. D'après Rognon (1994), ces pH élevés sont un facteur défavorable à la mobilité de nombreux éléments traces, qui ont un grand rôle physiologique au niveau des plantes. Une augmentation du pH bloque l'absorption de ces éléments sous des formes oxydées, que les plantes ne peuvent pas assimiler.

A la suite de températures plus élevées (insolation directe sur sol nu) et d'une très forte évaporation, l'eau capillaire migre vers des pF plus élevés et, en s'évaporant, abandonne ses

éléments dissous sous forme d'efflorescences salines. Ainsi, en passant des régions humides aux régions sèches, on assiste à une réduction progressive de la lixiviation puis, dans les cas extrêmes, à un changement de sens de migrations avec concentration des éléments dissous (en très faible quantité) à la surface des sols ou des roches. D'ailleurs la présence de sel vient ajouter un obstacle supplémentaire à l'absorption de l'eau du fait de la pression osmotique qui renforce encore l'action de la sécheresse (Rognon, 1994).

**d.** Fréquence, au moins dans les sols des zones semi-arides, de phénomènes d'hydromorphie

Ils sont liés à certaines sous-zones climatiques de la zone aride, qui sont les plus humides (humidité de pluie ou humidité d'inondation), ils ne sont pas répandus en zones arides, mais ils y existent cependant. Leur évolution est dominée par la présence d'un excès d'eau dû à la remontée d'une nappe phréatique à travers le profil, à un engorgement temporaire de certains horizons ou à un recouvrement de la surface du sol par des eaux d'inondation (Aubert, 1960).

Les « oueds » et les « dayas » constituent des exemples qui illustrent certains de ces paysages d'inondations temporaires dans nos régions arides d'Algérie.

Les oueds sont définis comme étant des cours d'eau dont l'écoulement est périodique (crue) formant des vallées à écoulement temporaire (Fabre, 1971). Quant au terme vernaculaire « daya », il caractérise une dépression fermée de l'ordre métrique à kilométrique où s'accumulent les eaux de ruissellement non ou peu salées. Les eaux se maintiennent quelques jours ou quelques semaines ; une partie s'évapore, une autre partie s'infiltré très lentement à travers un sol de texture moyenne à très fine, alors que le reste est utilisé par une végétation variée (Pouget, 1980a).

Conrad et *al.* (1967) distinguent trois types principaux de daya en fonction de leur taille et surtout de leur profondeur :

- type peu déprimé : 15 à 20 m de diamètre et quelques centimètres de dénivellation ;
- type un peu déprimé : diamètre de 60 à 150 m pour une dénivellation ne dépassant pas un mètre ; leur forme reste grossièrement circulaire avec des évaginations correspondant à des chenaux de ruissellement plus ou moins bien individualisés et profonds (comparée à une assiette creuse) ;
- type très déprimé : diamètre de l'ordre hectométrique sinon kilométrique, pour une dénivellation de plusieurs mètres ; le fond de la daya est plat.

Entre ces trois types principaux, tous les intermédiaires existent, d'ailleurs le même auteur se posait la question de savoir si " ces divisions arbitraires ne seraient pas en fait des étapes différentes d'un même processus?". Les travaux de Taibi et *al.* (1999) semblent lui

donner raison. En effet, grâce à l'utilisation de la télédétection satellitaire, ces auteurs ont proposé une évolution des dayas du stade naissant jusqu'au stade adulte, en se basant sur leur morphologie et leur végétation (Fig. 32).

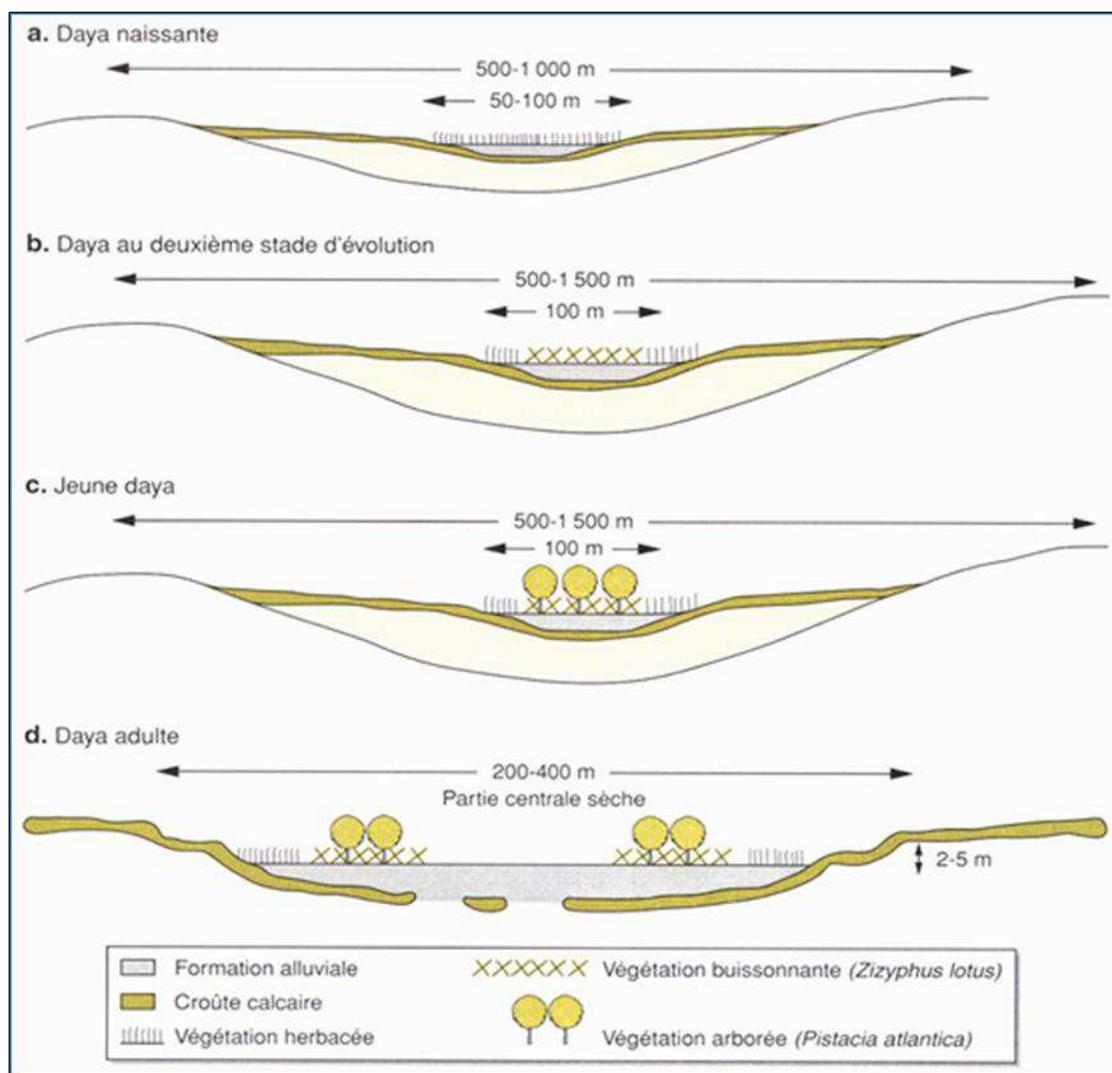


Fig. 32 : morphologie et végétation des dayas du stade naissant au stade adulte

(Taibi et al., 1999).

Selon Pouget (1980a), la topographie reste un des facteurs essentiels du régime hydrique des sols. La décarbonatation est plus poussée dans les cuvettes (dayas), les chenaux d'oueds alluvionnés et plus généralement dans les zones de ruissellement bénéficiant de conditions pédoclimatiques plus humides que les versants et les glacis. Les « sols » de ces oueds et dayas, de par leurs topographies et dynamiques respectives sont ainsi sujets aux phénomènes d'hydromorphie.

Selon Favrot et Vizier (1988), les « sols hydromorphes » (au sens large) comportent des horizons dont certains caractères sont attribuables à un excès d'eau. Celui-ci peut être dû

au seul défaut de perméabilité d'horizon (s) empêchant l'infiltration des précipitations dans le solum ou résulter de la concentration dans ce dernier de flux d'origine extérieure (inondation, ruissellement, transferts latéraux, remontée d'eau souterraine). L'excès d'eau entraîne la saturation des horizons par l'eau, c'est-à-dire l'occupation de tout l'espace poral accessible. La saturation par l'eau est plus ou moins durable dans l'année, elle peut affecter une partie ou la totalité du solum.

Selon Favrot et Vizier (1988), la saturation par l'eau limite les échanges gazeux entre le sol et l'atmosphère. Il peut en résulter un déficit en oxygène plus ou moins prolongé, qui entraîne :

- le développement de processus d'oxydo-réduction qui modifient la mobilité différentielle des constituants du sol, d'où des redistributions particulières de certains éléments, notamment le fer ;
- une évolution spécifique de la fraction organique lorsque la saturation intéresse la partie supérieure des solums ; l'anaérobiose provoque un ralentissement de l'activité biologique qui se traduit par une accumulation de matière organique et une production de substances propres à ces milieux saturés par l'eau.

### **2.1.3. Sols sous pistachiers de l'Atlas**

Les nombreux et différents travaux du laboratoire « Ressources Naturelles » de l'université Mouloud Mammeri sur les sols que colonisent des populations spontanées de pistachiers de l'Atlas en Algérie, ont montré que dans la majorité des cas :

- la texture limoneuse est récurrente dans tous les sols échantillonnés par les différents chercheurs ; ces textures varient entre limono-argileuse à sablo-limoneuse (Tableau 7b) ;
- leurs pH sont majoritairement basiques, mais exceptionnellement on peut trouver certains sols un peu acides comme c'est le cas de certains sols de Theniet El Had (Tissemsilt) (Tableau 8) ;
- leur teneurs en calcaire totale sont jugées dans leurs majorités modérément calcaires, mais peuvent dans certaines régions être très fortement calcaires comme c'est le cas de certains sols de la daya d'el Mergueb (M'sila) (Tableau 9) ;
- leur teneurs en matière organique sont en majorité estimées faibles, mais néanmoins peuvent être exceptionnellement élevés et même très élevés dans certaines zones d'étude comme le cas de certains sols de Timzerth (Laghouat) (Tableau 10).

Tableau 7b : Textures des différents sols sous pistachiers de l'Atlas précédemment étudiés selon un gradient d'aridité croissant (flèche) en Algérie.

Gradient d'aridité croissant ↑	Auteurs	Zones d'études	Textures
	Hamitouche (2016)	Daya El Gouffa (Laghouat)	Limoneuse, limoneuse fine
	Bounceur (2009)	Tilrhemt (Laghouat)	Limoneuse fine, limono-sableuse
	Amroune (2013)	Aiat Timzerth (Laghouat)	Sablo-limoneuse, limono-sableuse à limono-argilo-sableuse
	Boubrima (2014)	Aiat Timzerth (Laghouat)	Sablo-limoneuse à limono-sableuse
	Deguiche (2008)	Aiat Timzerth (Laghouat)	Limoneuse
	Boubrima (2014)	Saadi, Hassi Delâa (Laghouat)	Limoneuse à limoneuse fine, limono-sableuse et limono-argileuse
	Bentaleb (2011)	Boucedraia (Djelfa)	Limono-sableuse, limoneuse à limoneuse fine
	Limane (2009)	El-Mergueb (M'sila)	Limoneuse et sablo-limoneuse
	Tisgouine (2010)	Theniet El Had (Tissemsilt)	Limoneuse et limono-sableuse

Tableau 8 : Intervalles des pH des différents sols sous pistachiers de l'Atlas précédemment étudiés selon un gradient d'aridité croissant (flèche) en Algérie.

Gradient d'aridité croissant ↑	Auteurs	Zones d'études	pH
	Bourmine (2007)	Béni Ounif (Béchar)	8,09-8,46
	Hamitouche (2016)	Daya El Gouffa (Laghouat)	8,10-8,33
	Bounceur (2009)	Tilrhemt (Laghouat)	8,26-8,44
	Boubrima (2014)	Saadi, Hassi Delaâ (Laghouat)	7,53-8,02
	Amroun (2013)	Aiat, Timzerth (Laghouat)	7,27- <b>8,66</b>
	Deguiche (2008)	Aiat, Timzerth (Laghouat)	8,07-8,51
	Boubrima (2014)	Aiat, Timzerth (Laghouat)	7,57-7,88
	Bentaleb (2011)	Boucedraia (Djelfa)	7,39-8,40
	Limane (2009)	Daya el Mergueb (M'sila)	7,50-8,70
	Tisgouine (2010)	Theniet El Had (Tissemsilt)	<b>6,17</b> -7,52
	Tahrour (2005)	Oued Besbès (Médéa)	7,26-7,90

Tableau 9 : Intervalles des teneurs en calcaire total des différents sols sous pistachiers de l'Atlas précédemment étudiés selon un gradient d'aridité croissant (flèche) en Algérie.

Gradient d'aridité croissant →								
Auteurs	Limane (2009)	Bentaleb (2011)	Boubrima (2014)	Boubrima (2014)	Deguiche (2008)	Amroun (2013)	Bounceur (2009)	Hamitouche (2016)
Zones d'études	Daya el Mergueb (M'sila)	Boucedraia (Djelfa)	Saadi, Hassi delaâ (Laghouat)	Aiat, Timzerth (Laghouat)	Aiat, Timzerth (Laghouat)	Aiat, Tirlhemt (Laghouat)	Tirlhemt (Laghouat)	Daya el Gouffa (Laghouat)
CaCO <sub>3</sub> Total %	5,52 - <b>81,25</b>	2,53 - 13,56	10,41 - 22,80	9,58 - 13,75	5,62 - 51,87	19,37 - 23,27	7,81 - 25,31	<b>1,25</b> - 18,75

Tableau 10 : Intervalles des teneurs en matière organique des différents sols sous pistachiers de l'Atlas précédemment étudiés selon un gradient d'aridité croissant (flèche) en Algérie.

Gradient d'aridité croissant →								
Auteurs	Limane (2009)	Bentaleb (2011)	Boubrima (2014)	Deguiche (2008)	Amroun (2013)	Boubrima (2014)	Bounceur (2009)	Hamitouche (2016)
Zones d'études	Daya el Mergueb (M'sila)	Boucédraia (Djelfa)	Aiat, Timzerth (Laghouat)	Aiat, Timzerth (Laghouat)	Aiat, Timzerth (Laghouat)	Saadi, Hassi Delaâ (Laghouat)	Tirlhemt (Laghouat)	Daya El Gouffa (Laghouat)
M.O %	2,59-4,65	0,60-3,61	0,21-1,26	<b>0,1-2,43</b>	3,59- <b>10,26</b>	1,33-3,41	0,49-1,21	0,12-1,5

## 2.2. Influence de l'aridité sur les architectures racinaires

A la pression de l'aridité, les systèmes racinaires des plantes s'adaptent en développant une diversité architecturale inhérente. Dans ces milieux, Lemée (1978) y a distingué plusieurs types de systèmes racinaires, et ce, en fonction de la distribution des racines dans le sol.

a. Le système intensif (fasciculé) : de type Graminée avec un réseau très dense de racines et radicelles atteignant 30 à 50 cm de profondeur, pour un diamètre d'environ un mètre. Il peut être plus superficiel, moins dense et moins important (Fig. 33).

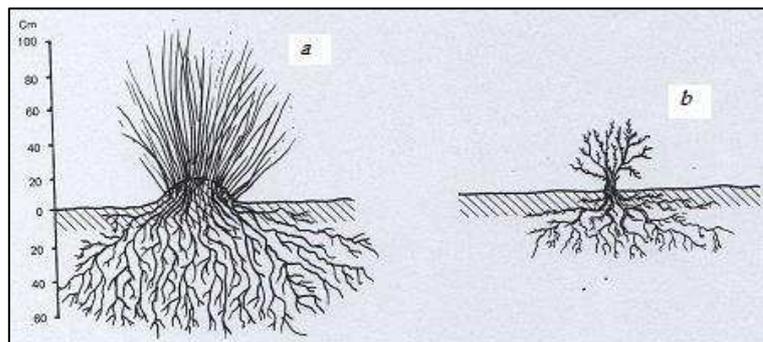


Fig. 33: systèmes racinaires intensifs : a: *Stipa tenacissima* ; b: *Artemisia herba-alba*.  
(Pouget, 1980a).

b. Le système à extension horizontale : on le retrouve surtout chez les espèces psammophiles, qui développent un réseau horizontal de racines et surtout de radicelles qui se trouvent juste au-dessous de la surface du sol pour bénéficier des moindres millimètres de pluie ou de rosée ("racines de rosée") (Fig. 34). Par ailleurs, les psammophiles vivaces possèdent de solides racines verticales d'ancrage, qui permettent aussi de puiser en profondeur une certaine humidité.

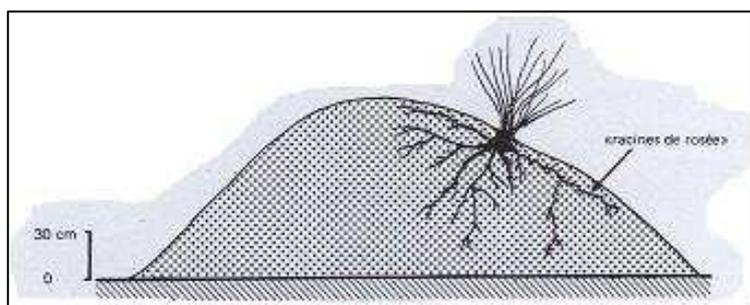


Fig. 34: système racinaire à extension horizontale (microdune avec *Aristida pungens*)  
(Pouget, 1980a).

c. Le système à extension verticale : il est constitué par une racine pivotante et ce chez un assez grand nombre d'espèces vivaces et même chez certaines annuelles (comme chez *Armeria plantagine*) (Fig. 35).

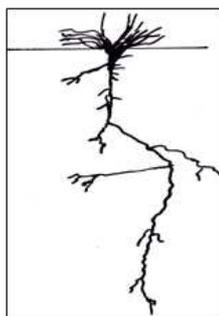


Fig. 35 : système racinaire à extension verticale d'*Armeria plantagine* (Lemée, 1978).

- d. Le système mixte à extension horizontale et verticale : le système vertical comprend généralement plusieurs racines importantes et profondes. Il se double d'un système horizontal plus superficiel, qui, chez les plantes vivaces, développe un réseau relativement étendu et ramifié de racines et de radicelles pour explorer (et exploiter) la terre humidifiée par les pluies (Fig. 36). Certaines plantes vivaces peuvent explorer des horizons à plusieurs mètres de profondeur, souvent jusqu'à la nappe phréatique. Selon Ozenda (1991), les plantes des milieux arides forment un réseau horizontal courant à peu de distance de la surface et pouvant utiliser à la fois l'eau de pluie et celle des condensations lorsqu'il s'en produit. D'autre fois, lorsque la nappe phréatique est à une profondeur accessible, les racines s'enfoncent à plusieurs mètres à la rencontre de l'eau.

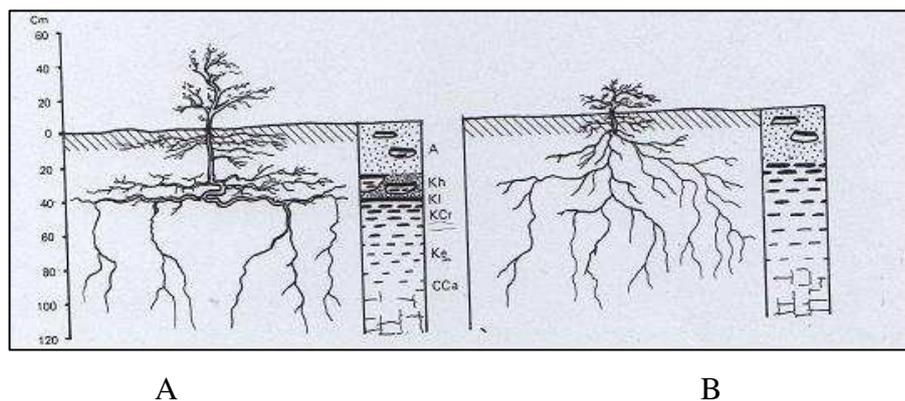


Fig. 36: système racinaire à extension mixte d'*Arthrophytum scoparium* (A) et (B) *Helianthemum hirtum* ssp. *ruficomum* (Pouget, 1980a).

Chez les ligneux et selon Breman et Kessler (1995) qui s'appuient sur une synthèse des données disponibles sur les systèmes racinaires des ligneux dans les régions semi-arides, on peut différencier la biomasse racinaire en racines fines et grosses racines. Bien que les racines

finer ne représentent qu'une petite fraction de la biomasse racinaire totale, elles constituent la surface d'absorption la plus importante du système racinaire.

Les racines fines absorbent l'eau et les éléments nutritifs. Elles sont associées au transfert mycorhizien et à l'incorporation des nutriments et enrichissement du sol en matières organiques et en nutriments lors de leur renouvellement (Berish et Ewel, 1988).

Les racines épaisses sont le support des plantes ligneuses. Elles peuvent ainsi s'enfoncer dans les couches profondes du sol. Les racines fines se développent plus particulièrement aux extrémités des grosses racines (Breman et Kessler, 1995).

La fonction du système racinaire est génétiquement déterminée tant que les conditions du milieu sont favorables. Dans des conditions de milieu défavorable, ce sont les conditions physiques qui prévalent (Kummerow et Mangan, 1981).

La flexibilité du système racinaire varie en fonction des espèces ligneuses. En effet et selon Hellmers et *al.* (1955) ; Hairiah et Van Noordwijk (1986), on peut différencier les systèmes racinaires des ligneux en trois types (Fig. 37).

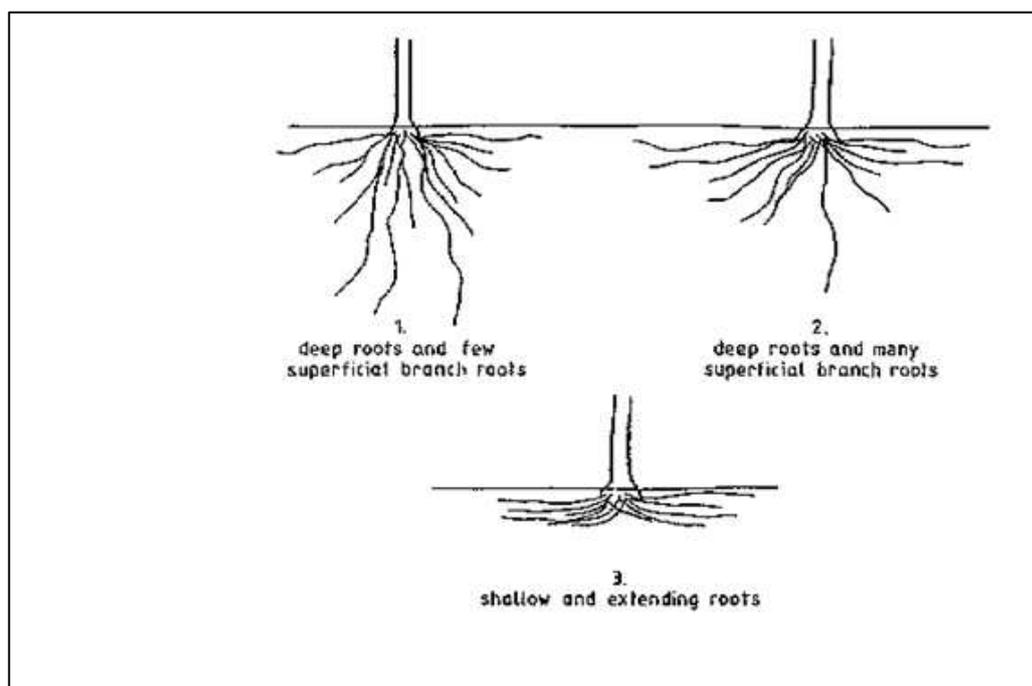


Fig. 37: les trois architectures racinaires chez les ligneux (selon Hellmers et *al.*, 1955 ; Hairiah et Van Noordwijk, 1986).

1. pénétration profonde des racines primaires et faibles ramifications secondaires superficielles (1).

2. pénétration profonde des racines primaires et fortes ramifications secondaires superficielles (2).

3. racines horizontalement étalées à faible profondeur dans le sol (3).

Selon Menaut (1983 *In* Breman et Kessler, 1995), dans les régions semi-arides ( $400 < P < 600$  mm), les racines sont le plus souvent peu profondes. En fait, des études systématiques effectuées sur des racines de plantes ligneuses indigènes dans les régions semi-arides, démontrent une prédominance de systèmes racinaires de type 2 ou 3 seulement, quel que soit la profondeur du sol.

Le système racinaire du pistachier de l'Atlas a été peu étudié. Les travaux menés par Chaba et *al.* (1991) ont concerné des expérimentations sur la germination, les rythmes de croissance et la morphogenèse racinaire pour préconiser des solutions pratiques pour la production de plants de pistachier de l'Atlas. Ils ont montré que pendant le mois de janvier l'activité racinaire est faible (2 cm/semaine ; avec une température du sol de 13°C). Dès le mois de février, la croissance racinaire s'active. Au mois de mai, la vitesse de son allongement atteint en moyenne 12 cm/semaine avec une température du sol d'environ 20°C ; 20 semaines après le semis, le pivot atteint en moyenne 50 cm de long. Le système racinaire d'un semis non traumatisé est caractérisé par un pivot vertical à croissance indéfinie et des racines latérales fines obliques à croissance limitée. Seul le pivot est orthogéotrope. Mais, sur un plant ayant subi un traumatisme à 10 cm de la coiffe, nous pouvons observer :

- 4 à 5 racines latérales les plus proches du traumatisme se transformant rapidement ;
- leur diamètre s'accroît et atteint celui du pivot initial ;
- leur vitesse d'allongement est de 5 cm/ semaine environ ;
- elles prennent une direction verticale et remplacent le pivot ; nous observons également dans ce cas l'apparition de racines horizontales de deuxième ordre.

Les travaux des chercheurs du Laboratoire Ressources Naturelles de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou en l'occurrence Belharret et Rekkeb (2004) (population de Ain Oussara ; wilaya de Djelfa), Ait-Slimane (2004) (population de Béni Ounif ; wilaya de Béchar), Tahrou (2005) (population de Oued Bésbès ; wilaya de Médéa), Kebci (2008) (population de Tilrhemt ; wilaya de Laghouat), Abdous (2010) (populations de Theniet El Had ; wilaya de Tissemsilt et de la daya de Tilrhemt ; wilaya de Laghouat) et Haboul (2011) (population de Boucédraïa ; wilaya de Djelfa) ont mis en évidence pour *Pistacia atlantica* un système à extension horizontale et verticale (système généralisé de type 2).

Les travaux de Limane et Smail-Saadoun (2011) sur la population de pistachier de l'Atlas de la daya d'el-Mergueb (M'sila), ont conclu que le jeune pistachier de l'Atlas émet un pivot séminal orthogéotrope qui disparaît en se réorganisant en fonction de la texture du sol. Si celle-ci est sableuse, donc peu humide et moins compact, quelques racines plongent profondément à la recherche d'humidité et de stabilité ; d'autres racines continuent à croître

dans les niveaux peu profonds. Si le sol est limoneux, donc plus humide mais aussi plus compact, les racines croissent dans les niveaux peu profonds et développent ainsi un réseau racinaire superficiel. Avec l'âge, il peut émettre de puissantes racines profondes à la recherche d'humidité et d'ancrage.

Les travaux de Boubrima (2014) sur les populations de pistachier de l'Atlas appartenant à deux dayas (Hassi Delâa et Aïat ; wilaya de Laghouat), ont montré que le comportement souterrain du pistachier de l'Atlas s'exprime à l'âge jeune par un pivot orthogéotrope rectiligne portant plusieurs racines latérales et fines, il évolue par la suite en un système racinaire vigoureux à enracinement superficiel et profond. Entre les deux stades de développement, le pistachier de l'Atlas adopte un comportement intermédiaire, le pivot dégénère et se fourche en racines moyennement épaisses. Les différences qui existent entre les deux populations étudiées sont dues au sol qui conditionne le développement racinaire. Quand celui-ci est plus limoneux et argileux, les racines des sujets jeunes dans ce cas sont plus épaisses, peu ramifiées, moins longues et colonisent plutôt les niveaux superficiels du sol, l'enracinement est ainsi qualifié de superficiel. Quand le sol est meuble à texture sablo-limoneuse, il favorise l'enracinement profond et superficiel chez les jeunes sujets, les racines sont moyennement épaisses à extension latérale et verticale considérables et très ramifiées. Concernant les sujets âgés dans les deux dayas, la croissance radiale est favorisée par rapport à l'allongement racinaire, les racines sont vigoureuses et superficielles, mais plongent en profondeur, l'enracinement est alors mixte : superficiel et profond.

Les travaux de Hamitouche (2016) sur la population de pistachier de l'Atlas de la daya d'El Gouffa (Laghouat) ont aussi mis en évidence la prépondérance des paramètres physiques dans le façonnement de l'architecture racinaires des individus échantillonnés. En effet, les résultats ont montré que les pistachiers jeunes et moyens montrent des pivots bien individualisés, à pénétration assez profonde. Les racines superficielles sont aussi bien développées. Les sujets âgés possèdent un système racinaire mixte. Les taux élevés de sable influencent l'architecture racinaire, en réduisant la compaction et facilitent ainsi la pénétration profonde des pivots et le développement important des racines superficielles.

### **2.3. Interactions sol / racines en milieux arides**

Les travaux synthétiques de Canadell et *al.* (1996) ont montré que la majorité de la biomasse racinaire se situe dans les 50 premiers cm du sol, et qu'ainsi une fraction minime atteint les profondeurs supérieures. Les plantes des milieux arides ou des milieux à longue saison sèche ont montré les plus profonds enracinements. La présence d'eau dans les couches profondes rend possible la survie de certaines plantes, qui vont chercher cette eau jusqu'à une

profondeur de 53 m dans le désert au sud-ouest des Etats Unis (Phillips, 1963), de 68 m et même 140 m de profondeur, quand la nappe phréatique y est localisée comme dans le cas de la savane sèche du Kalahari central (Jennings, 1974).

Cependant, beaucoup d'espèces végétales ont la capacité de s'enraciner profondément dans le sol, et procurent ainsi assez de données pour défier le « dogme des plantes à enracinement surtout superficiel ».

Il est communément admis que les racines profondes sont principalement limitées aux sols sableux où l'impédance mécanique qui s'oppose à la pénétration racinaire y est faible. Au contraire, de nombreux exemples rapportés par ces auteurs ont montré que des plantes ont pu trouver leurs voies vers les couches très profondes, même dans les sols argileux compacts, les sols rocheux et à travers les couches denses du sol.

L'action du système racinaire se manifeste en outre d'une façon mécanique en élargissant les fissures de la roche mère, particulièrement les racines des arbres et des arbustes. Plus généralement, il favorise la division du sol, avec le développement de la structure et de la porosité (Pouget, 1980a).

Pour certaines espèces (exemple : phréatophytes), leur survie dans les écosystèmes arides dépend exclusivement de leur capacité à émettre des racines vers les nappes phréatiques permanentes ; même si une petite fraction des racines arrivent à cette source, la quantité d'eau transférée vers la plante pourrait être conséquente. La signification fonctionnelle de ces racines profondes concernant le flux hydrique dans les écosystèmes soumis à une forte pression évaporative, a été démontré par le mécanisme d'« Hydraulic lift » (ascenseur hydraulique), mécanisme rapporté chez de nombreuses espèces (Richard et Caldwell, 1987 ; Dawson, 1993). Durant la nuit, les racines profondes absorbent l'eau des couches profondes, cette eau est ensuite libérée dans les couches superficielles par les racines horizontales. L'eau est réabsorbée le lendemain par la même plante et par les racines des plantes voisines qui n'y ont pas accès, ce qui permet de maintenir un taux élevé d'évapotranspiration durant les périodes sèches.

Ultérieurement, les travaux synthétiques de Schenk et Jackson (2002a) ont montré qu'en moyenne, au moins la moitié de la biomasse racinaire se trouve dans les premiers 30 cm du sol de tous les systèmes ; cependant cet enracinement est sous l'influence de plusieurs facteurs dont principalement :

- le climat

En effet, celui-ci explique le plus gros des variations concernant la profondeur de l'enracinement ; celui-ci augmente (entre autres) dans les steppes semi-arides selon un gradient d'aridité allant de l'humide au sec ; le système racinaire devenant plus profond avec l'allongement de la saison sèche ; les enracinements profonds (>1,5 m) sont retrouvés seulement dans les climats avec une saison chaude de six mois ou plus ; à la même latitude, les précipitations apparaissent comme le facteur différentiel de l'enracinement profond entre les prairies et les steppes semi arides ;

- les caractéristiques du sol

C'est dans les sols sableux qu'on retrouve les enracinements les plus profonds comparé aux sols limoneux ou argileux ; ainsi, le principal facteur limitant l'enracinement profond dans les écosystèmes arides pourrait être la profondeur de l'infiltration de l'eau dans ces sols ; les différences dans les profondeurs d'infiltration pourraient expliquer en partie que dans les écosystèmes aux ressources hydriques limitées, les racines s'approfondissent dans les sols à texture grossière comparé aux sols à texture fine, parce que les sols grossiers ont une capacité de rétention en eau plus faible et l'eau tend à percoler profondément ;

- le type de végétation

Les végétations arbustives et arborées méditerranéennes ont une plus grande proportion de racines dans les niveaux superficielles que celles du semi désert ou du désert. Les ligneux en moyenne ont des racines plus profondes que celles des herbacées.

### **3. Matériels et méthodes**

#### **3.1. Méthode d'échantillonnage**

Rappelons que l'espèce étudiée est dioïque (les fleurs mâles et les fleurs femelles sont portées par des pieds différents). Afin d'obtenir un échantillon approchant la représentativité (autant de mâles que de femelles), nous devons procéder à un échantillonnage en « grappe ». Cette méthode consiste en la subdivision de la population en deux groupes (donc deux grappes), l'un comportant les individus mâles et le deuxième les individus femelles. Dans chaque groupe, nous devons constituer des sous-groupes d'âge d'au moins trois classes. Dans chaque sous-groupe, nous devons procéder à un échantillonnage aléatoire où chaque individu avait en principe la même probabilité d'être choisi.

*In situ*, contrairement aux cultures organisées et contrôlées, les choses sont beaucoup plus difficiles à mettre en œuvre (cas de populations spontanées). La disponibilité des classes d'âge n'est pas évidente pour toutes les populations échantillonnées. Ajouté à cela, l'accessibilité des individus « échantillonnables » n'est pas toujours acquise. En effet, des barrières physiques nous empêchaient d'y accéder (sols très compacts, grandes touffes très

dense et épineuses de *Ziziphus*,...). Malgré toutes ces contraintes réelles, nous avons pu faire un échantillonnage le plus représentatif que possible.

### 3.2. Caractéristiques générales des individus échantillonnés

Leur échantillonnage s'est effectué au printemps (à la remontée biologique). Dans chaque station échantillonnée, et à défaut de disposer de tarière de Pressler pour déterminer l'âge exacte des individus échantillonnés, nous avons considéré des critères dendrométriques facilement mesurables :

a. la hauteur : pour les petits sujets, leurs hauteurs ont été directement mesurées ; pour les plus grands, nous avons utilisé la technique dite de « la croix du bûcheron » qui donne une estimation des hauteurs assez acceptables ;

b. la circonférence du tronc : mesurée directement à 1,20 m du collet de l'arbre au moyen d'un mètre ruban ; cependant, la seule exception concerne le très jeune sujet ME6 qui ne mesure que 0,5 m de haut, la circonférence de son tronc a été prise par défaut au milieu de son tronc ;

c. le diamètre de la couronne : pour les houppiers circulaires, nous avons directement mesuré la distance entre les limites de la projection verticale au sol dudit houppier ; pour ceux qui étaient ellipsoïdes, nous avons calculé la moyenne des deux diamètres (le plus grand et le plus petit de l'ellipse).

### 3.3. Méthode pour la détermination des classes des circonférences (classes d'âges relatifs) dans chaque population

Pour ce faire, nous avons suivi les étapes de calculs suivants.

- Détermination de l'étendue ( $d$ ) de la série statistique :

$$d = Xi \text{ max} - Xi \text{ min}$$

( $Xi \text{ max}$  = valeur maximale de la série et  $Xi \text{ min}$  = valeur minimale de la série.)

- Calcul de l'amplitude ( $a$ ) d'une classe :

$$a = d / (k - 1)$$

( $k$  étant le nombre de classes)

Pour déterminer le nombre de classes ( $k$ ), nous avons appliqué la méthode de Liorzou (1956) :

$$k = 1 + (10 \log n / 3)$$

( $n$  étant le nombre d'observations)

- Calcul de la borne inférieure ( $Li$ ) de la première classe :

$$Li = Xi \min - \left(\frac{a}{2}\right)$$

- Calcul de la borne supérieure ( $Ls$ ) de la première classe :

$$Ls = Li + a$$

Nous obtenons à la fin : le nombre de classe ( $k$ ), chaque classe a une amplitude ( $a$ ), la première classe ayant comme valeurs  $[Li - Ls [$ .

### 3.4. Profils et mesures racinaires

En Algérie, le pistachier de l'Atlas est une espèce officiellement protégée (Décret exécutif n° 93-285 du 23/11/1993 fixant la liste des espèces végétales non cultivées protégées). Il est par conséquent interdit de sacrifier un quelconque individu.

Dans chaque population de pistachier de l'Atlas, et afin de préserver l'intégrité des arbres, nous avons réalisé des profils racinaires unilatéraux (un total de 27 profils racinaires). A la fin de chaque opération, nous ensevelissons systématiquement les racines excavées.

Utilisant des pioches, truelles, binettes et pelles, nous avons creusé verticalement à partir du collet jusqu'à une profondeur moyenne de 80 cm, une fosse qui nous a permis de découvrir uniquement un côté du système racinaire (Fig. 38), ce qui a ainsi permis de préserver la vie des arbres échantillonnés.

La largeur de chaque fosse dépend des longueurs des racines découvertes. Cette méthode correspond à celle de Rood et al. (2011), de loin moins laborieuse car ils bénéficiaient de l'érosion naturelle des rives des rivières, soumises aux torrents saisonniers pour étudier les profils racinaires unilatéraux et naturellement excavés.

La limite de 80 cm de profondeur moyenne nous a été imposée par la dalle calcaire présente dans ces régions arides d'Algérie et héritée du Quaternaire (Pouget, 1980b). Sa profondeur étant variable selon les stations, nous nous sommes limités, pour moins de variance supplémentaire, à la station où elle y est relativement la moins profonde, en l'occurrence M'sila dans cette étude.

Par ailleurs, dans la littérature, nous avons trouvé que 60% à 90% des racines des arbustes et arbres sont localisés dans les premiers 50 cm du sol (Dobson et Moffat, 1995 ; Jackson et al., 1996) ; dans la majorité des écosystèmes, la biomasse racinaire colonise le

premier mètre du sol (Jackson et *al.*, 1996). Ces mêmes auteurs requièrent comme condition d'admissibilité des informations sur les études du système racinaire, un minimum de 0,5 m de profondeur. Schenk et Jackson (2002a) ont travaillé avec des profils d'une profondeur moyenne de 0.88 m.

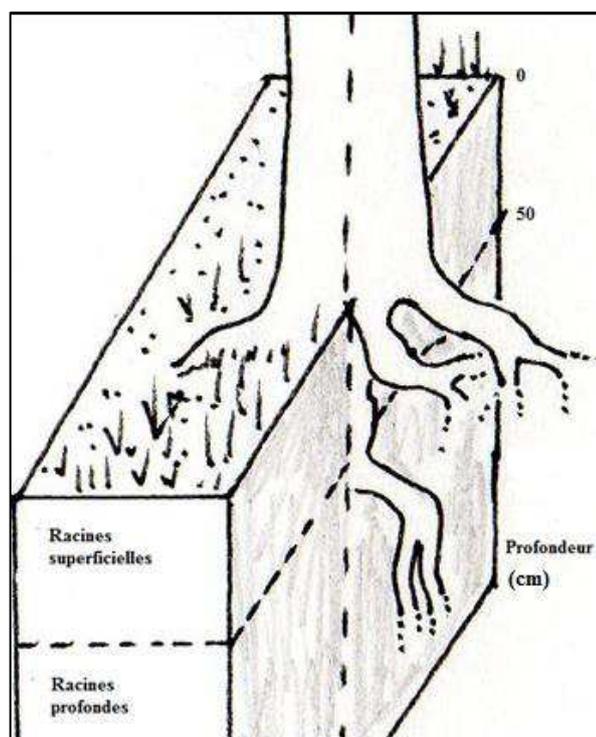


Fig. 38 : profil racinaire unilatéral (qui découvre un côté uniquement du système racinaire).

La difficulté de la tâche sur le terrain est aussi considérable. En effet, l'excavation des systèmes racinaires d'arbres adultes est très laborieuse et fastidieuse (Ganatsas et Tsakalimi, 2003 ; Gregory, 2006).

Pour chaque profil racinaire, nous avons identifié le nombre de racines principales superficielles (RS), qui colonisent les 50 premiers cm du sol, et le nombre de racines principales profondes (RP), qui plongent à plus de 50 cm de profondeur. Cette subdivision en deux niveaux est inspirée de l'« hypothèse des deux couches »<sup>1</sup> proposée par Walter (1971). Il a subdivisé les sols en deux niveaux : le profond, dont l'eau y est seulement atteinte par les arbres, et le niveau superficiel, où les plantes herbacées constituent leurs principales compétitrices.

Quant à déterminer la limite entre le niveau superficiel et le niveau profond, nous avons trouvé dans la littérature un spectre varié. Le degré d'évolution des sols (donc leurs profondeurs) n'est pas le même dans les biomes terrestres ; toute subdivision devient alors

<sup>1</sup> Two layers hypothesis

relative. Ainsi, plusieurs modèles existent, proposés par leurs auteurs dans le contexte de leur problématique. Nous citons le MAPSS de Neilson (1995), le CASA de Potter et *al.* (1993), le TEM de Raich et *al.* (1991) et Mellilo et *al.* (1993), et même le modèle CENTURY de Parton et *al.* (1988), qui est une exception avec ses 5 niveaux de subdivision.

Nous avons opté pour la limite de 50 cm entre le niveau superficiel et celui qui est profond. Nous nous sommes inspirés des travaux de Floret et Pontanier (1982), parmi les pionniers dans l'étude des zones arides en Afrique du Nord. En effet, ils considèrent que les racines qui ne dépassent pas les 50 cm de profondeur sont considérées comme superficielles.

Les racines ciblées sont celles considérées principales, émergentes directement du pivot (quand il est présent) ou du collet. Elles ont un diamètre d'au moins 5 mm (Tufekcioglu et *al.*, 1999). Pour chaque racine principale (superficielle ou profonde), nous avons :

- compté le nombre de ramifications dans le sens centrifuge (développemental) (Berntson, 1997) ; ainsi, nous distinguons entre le nombre de ramifications des racines superficielles (NRS), et celui des racines profondes (NRP), et enfin le nombre total des racines (NRT) ;

- mesuré les longueurs racinaires, qui correspondent à la somme des longueurs des segments constitutifs des racines ; ainsi, nous distinguons entre la longueur totale des racines superficielles (LTRS), celle des racines profondes (LTRP) et de la longueur totale racinaire (LTR) ;

- mesuré la circonférence moyenne des racines, qui correspond à la moyenne des circonférences des segments constitutifs de chaque racine superficielle ou profonde ; ainsi, nous distinguons entre la circonférence moyenne des racines superficielles (CMRS), la circonférence moyenne des racines profondes (CMRP), et celles du total racinaire (CMR).

### **3.5. Echantillonnage des sols et analyses physiques et chimiques**

Les fosses de 80 cm réalisées pour les profils racinaires nous ont aussi servi de fosses pédologiques (*cf.* Fig. 38). Les sols de ces zones arides (excepté ceux de Sidi Naamane, le plus septentrional du transect nord-sud choisi) sont généralement peu différenciés (Demangeot et Bernus, 2001), spécialement ceux en milieu hyperaride où la pédogenèse est extrêmement réduite (Pouget, 1980a). Ainsi, et pour éviter un maximum de variance additionnelle, nous avons choisi de diviser également chaque profil pédologique en 4 niveaux de 20 cm. Ainsi, nous avons échantillonné 4 niveaux de sol sous chaque pistachier de l'Atlas étudié, ce qui fait un total de 92 échantillons<sup>2</sup>.

---

<sup>2</sup> Cependant, 2 individus dans chaque station végètent dans le même sol (les cas du 6<sup>ème</sup> et 7<sup>ème</sup> individu à Sidi Naamane, du 5<sup>ème</sup> et 6<sup>ème</sup> à el-Mergueb, du 1<sup>er</sup> et le 2<sup>ème</sup> à Lekhneg et du 3<sup>ème</sup> et 4<sup>ème</sup> à Béni Ounif) ; donc, nous

Une fois échantillonnés *in situ*, en laboratoire nous avons étalé les sols et laisser sécher à l'air ambiant pendant 48 heures puis, et après broyage et tamisage à 2 mm, nous avons obtenu une terre fine que nous avons conditionné dans des boites hermétiques.

Nous avons pu ensuite déterminer les caractéristiques physiques et chimiques.

### 3.5.1. Granulométrie

Elle a été réalisée selon la méthode internationale utilisant la pipette de Robinson. Après la destruction de la matière organique par l'eau oxygénée (à 20 volumes), les particules minérales sont dispersées à l'aide de l'héxamétaphosphate de sodium à 40%. Les prélèvements des argiles et limons fins sont effectués à l'aide de la pipette de Robinson. Les sables ont été récupérés par tamisage après siphonage.

Nous avons calculé les proportions des différents composants granulométriques, puis à l'aide du triangle de texture, nous avons pu déterminer les textures respectives de nos échantillons.

### 3.5.2. Capacité de rétention en eau

Elle est aussi appelée capacité de saturation en eau d'un sol. C'est la quantité d'eau maximale que ce dernier peut absorber avant qu'il ne perde sa cohésion ; elle peut être exprimée en ml par 100 g de terre (Aubert, 1978).

Dans une capsule à fond criblé tapissé d'un papier filtre, nous y avons versé 10 g de sol (soit  $P_1$  le poids total obtenu). A l'aide d'une pissette, nous avons arrosé ce sol progressivement jusqu'à saturation apparente et apparition d'eau gravitaire de la base de la capsule. Les capsules sont laissées pour ressuyage pendant 12 h sur un lit de même sol. Elles sont pesées ( $P_1$ ) et mises à l'étuve à 105 °C pendant 48 h, puis repesées à nouveau (soit le poids  $P_2$ ). On déduit l'humidité maximale retenue par chacun de nos échantillons de sol (leur capacité de rétention en eau) en appliquant la formule :

$$H_2O(\%) = \left( \frac{P_1 - P_2}{P_1} \right) \times 100$$

### 3.5.3. pH eau

Il a été mesuré dans une suspension d'eau (rapport sol/eau = 1/2,5) à l'aide d'un pH mètre. L'estimatif considéré (annexe 1) pour commenter les résultats est celui proposé par Baize (2000).

---

avons considéré le même échantillon de sol pour les deux individus, ce qui explique le manque de 4 échantillons de sol dans chaque station ce qui fait un total de 92 échantillons au lieu de 108.

#### 3.5.4. Taux de calcaire total

Son dosage a été déterminé par la méthode volumétrique. Elle se fait par attaque du carbonate de calcium par l'acide chlorhydrique selon la réaction :



Nous avons ensuite procédé au titrage de l'excès d'HCl par la soude (NaOH) en présence de phénophtaléine. Nous avons calculé ensuite le taux de calcaire total par la formule :

$$CaCO_3(\%) = (Vt - Ve) \cdot 12,5$$

où:  $Vt$  : volume témoin et  $Ve$  : volume d'échantillon.

L'estimatif considéré (annexe 2) pour commenter les résultats est celui proposé par Baize (2000).

#### 3.5.5. Taux de carbone organique

Il a été dosé par la méthode de Anne (Jackson, 1965 *In* Aubert, 1978). Le carbone organique est oxydé par du bichromate de potassium en milieu sulfurique. Le bichromate doit être en excès ; la quantité réduite est en principe proportionnelle à la teneur en carbone organique. L'excès de bichromate de potassium est titré par une solution de sel de Mohr en présence de diphénylamine, dont la couleur passe du bleu foncé au bleu vert (le virage se fait à la goutte). Connaissant le pourcentage de carbone organique, le taux de matière organique (M.O%) peut être approximativement obtenu par la formule :

$$MO (\%) = \% \text{ de } C \times 1,72$$

L'annexe 3 représente l'estimatif considéré pour commenter les résultats obtenus (Soltner, 1982).

#### 3.6. Analyses statistiques

Nous avons méthodiquement fait subir aux résultats obtenus des tests statistiques qui nous ont permis de nous orienter lors de la discussion de ces travaux dans le sens le plus significatif, en adéquation avec la problématique posée. Les outils utilisés sont : Microsoft Office Excel 2010 (pour les tests de corrélations de Pearson, les courbes de tendances et leurs coefficients de corrélations ( $R^2$ )) et Statbox 7.5 (pour les tableaux de corrélations de Pearson et les ACP).

#### 4. Résultats et discussions

### **Volet I. Réponses architecturales racinaires de quatre populations de pistachier de l'Atlas à des variations de propriétés physiques et chimiques de leurs sols sous-jacents respectifs**

#### 1. Station de Sidi Naamane (Médéa)

##### 1.1. Caractéristiques des individus échantillonnés

Le tableau 11 résume les caractéristiques des pistachiers de l'Atlas échantillonnés à Sidi Naamane.

Tableau 11 : caractéristiques des individus échantillonnés à Sidi Naamane.

Stations et coordonnées	Code des Individus	Sexe	Hauteur (m)	Circonférence du tronc (cm)	Diamètre de couronne (m)
Sidi Naamane 35° 11 .354 N 3° 1.248 E Alt. 765.35 m	SN1	F	7	254	12
	SN2	M	7	127	7.2
	SN3	F	5	104	6.8
	SN4	F	7	118	7.6
	SN5	M	6	106	6
	SN6	M	8	149	7.5
	SN7	M	8	242	7.5
	SN8	F	7	234	7

SNn : individu n ; F ; Femelle ; M ; Mâle.

L'échantillon est constitué d'autant de mâles que de femelles.

##### 1.2. Estimation des classes d'âges relatifs des individus échantillonnés à Sidi Naamane

Pour ce faire, nous avons appliqué la méthode de Liorzou (1956) (cf. pp. 68/69). Nous avons obtenu les résultats suivants pour cette population (Tableau 12).

Tableau 12: classes des circonférences des troncs et âges relatifs des individus échantillonnés à Sidi Naamane.

$X_{i\ min}$	104	Classes		n	Code individu	Classe d'âge/ (Symbole)
$X_{i\ max}$	254	1	[79 - 129[	4	SN2, SN3, SN4, SN5	Jeune / (j)
Etendue de la classe	$d$	2	[129 - 179[	1	SN6	Relativement Agé / (r.a)
Nombre de classes	$k$	3	[179 - 229[	0	/	/
Amplitude d'une classe	$a$	4	[229 - 279[	3	SN1, SN7, SN8	Âgé / (a)
Borne inférieure de la 1 <sup>ère</sup> classe	$Li$	Total		8	8	3
Borne supérieure de la 1 <sup>ère</sup> classe	$Ls$					

Les résultats obtenus montrent que l'échantillon de la population de Sidi Naamane est constitué de 4 classes de circonférence de tronc. Donc nous considérons par analogie que la première classe est celle des jeunes individus, elle renferme les individus SN2, SN3, SN4 et SN5. La 2<sup>ème</sup> classe est celle des individus relativement âgés, elle ne renferme que le sujet SN6, et enfin la 4<sup>ème</sup> classe comportant les individus âgés qui sont SN1, SN7 et SN8. La 3<sup>ème</sup> classe ne comporte aucun sujet.

### **1.3. Caractéristiques pédologiques des sols sous pistachiers de l'Atlas échantillonnés**

#### **1.3.1. Résultats**

Les résultats des analyses physiques et chimiques des sols sous pistachier de l'Atlas de cette station sont présentés dans deux tableaux. Le premier (Tableau 13) comporte les résultats détaillés, obtenus pour les quatre niveaux de chaque profil pédologique réalisé sous chaque pistachier de l'Atlas échantillonné. Le tableau 14 contient les moyennes des quatre niveaux de sol pour ces mêmes sujets.

##### **1.3.1.1. Texture**

Nous constatons que parmi tous les échantillons de sol, celui du sujet SN1 contient en même temps le niveau le plus riche en argiles avec ses 58,63% dans son niveau superficiel (0-20 cm), mais aussi celui le plus pauvre en argiles avec les 16,61% de son niveau profond (60-80 cm). De plus, ce même sol contient le niveau le plus riche en limons fins avec les 42,16% de son niveau (40-60 cm), par contre le niveau (60-80 cm) du sol des sujets SN6 et SN7 est le plus pauvre.

Quant aux limons grossiers, nous constatons que c'est le sol du sujet SN1 qui en contient la plus forte proportion avec 48,24% de son niveau (60-80 cm), mais la plus faible teneur est localisée au niveau (0-20 cm) du sol du sujet SN4.

Les proportions minimales et maximales des taux des sables se partagent entre le sol des sujets SN6/SN7 et le sol du sujet SN8. En effet, le niveau le plus riche en sables fins est le niveau (40-60 cm) du sol du sujet SN8 avec ses 29,30% ; il a par ailleurs le taux le plus faible en sables grossiers avec les 4,85% de son niveau (60-80 cm).

Le sol des sujets SN6/SN7 contient en même temps le niveau le plus riche en sables grossiers avec les 57,44% de son niveau (60-80 cm) et le niveau le plus faible en sables fins avec les 6,72% de son niveau (20-40 cm).

Les sols sous pistachier échantillonnés à Sidi Naamane sont majoritairement argileux à limoneux argileux. En effet, leurs fractions fines (argiles + limons fins) représentent en moyenne plus de 50% de la fraction granulométrique de ces sols (Tableau 14 et Fig. 39).

Tableau 13 : caractéristiques physiques et chimiques des sols sous pistachier de l'Atlas de la station de Sidi Naamane.

Sol	Niveaux (cm)	A	LF	LG	SF	SG	Texture	CR	pH	CaCO <sub>3</sub>	MO
SN1	0-20	<b>58.63</b>	11.58	9.56	13.55	6.67	A	<b>43.14</b>	8.06	10.00	5.50
	20-40	31.81	38.21	4.06	10.70	15.21	LA	38.98	8.88	44.38	7.83
	40-60	26.67	<b>42.16</b>	6.82	9.68	14.67	LA	36.67	8.54	<b>66.88</b>	6.98
	60-80	<b>16.21</b>	15.00	<b>48.24</b>	9.54	11.01	LS	36.12	8.52	58.13	7.19
SN2	0-20	26.68	4.88	39.62	15.77	13.05	LA	39.09	8.04	16.25	8.46
	20-40	31.01	37.13	8.74	9.81	13.31	LA	36.50	8.86	9.38	9.94
	40-60	37.08	24.47	9.81	15.66	12.97	LA	38.30	<b>9.29</b>	10.63	7.40
	60-80	39.50	9.52	20.17	16.55	14.25	LA	37.33	8.92	14.38	7.83
SN3	0-20	40.82	8.20	19.45	16.94	14.59	A	41.18	8.35	21.88	6.98
	20-40	43.45	10.78	15.20	15.37	15.20	A	38.80	8.44	21.25	7.40
	40-60	43.78	17.70	6.35	17.83	14.34	A	39.97	8.09	21.88	7.83
	60-80	52.87	16.36	3.99	12.08	14.71	A	39.83	8.61	19.38	7.19
SN4	0-20	35.15	28.97	<b>2.45</b>	13.96	19.46	LA	38.07	8.12	32.50	7.83
	20-40	41.10	21.30	5.70	14.17	17.73	A	40.82	8.12	18.13	9.10
	40-60	39.89	16.98	12.21	11.55	19.37	A	37.00	8.21	35.00	6.98
	60-80	37.23	15.02	13.94	14.54	19.28	LA	38.62	8.29	31.88	8.04
SN5	0-20	47.54	18.11	7.61	15.91	10.83	A	38.32	8.11	15.63	8.67
	20-40	34.92	35.90	8.43	14.33	6.42	LA	37.70	8.65	19.38	7.83
	40-60	40.92	10.90	18.17	19.64	10.38	AS	38.72	8.69	15.63	7.19
	60-80	37.77	11.21	8.69	17.61	24.72	LA	<b>32.93</b>	8.75	16.25	6.35
SN6 & SN7	0-20	42.96	15.01	8.63	12.75	20.65	A	41.46	8.24	11.25	<b>10.37</b>
	20-40	27.35	2.64	7.54	<b>6.72</b>	55.75	LAS	37.81	8.55	5.63	7.62
	40-60	42.60	22.04	13.05	13.51	8.80	LA	35.61	8.4	11.88	8.25
	60-80	29.59	<b>2.31</b>	2.77	7.89	<b>57.44</b>	LAS	35.67	8.18	6.88	5.50
SN8	0-20	51.52	15.20	3.73	12.40	17.16	A	37.62	<b>7.97</b>	32.50	2.96
	20-40	46.32	16.59	7.81	11.93	17.35	A	37.12	8.47	9.38	2.75
	40-60	33.63	8.62	20.59	<b>29.30</b>	7.87	LA	33.86	8.69	8.13	<b>1.69</b>
	60-80	32.18	13.44	25.09	24.44	<b>4.85</b>	LA	33.14	8.68	<b>2.50</b>	2.96
<i>Moyennes</i>		<i>38,18</i>	<i>17,51</i>	<i>12,80</i>	<i>14,43</i>	<i>17,07</i>	<i>/</i>	<i>37,87</i>	<i>8,45</i>	<i>20,96</i>	<i>6,95</i>
<i>Ecart type</i>		<i>9,04</i>	<i>10,58</i>	<i>10,65</i>	<i>4,71</i>	<i>12,09</i>	<i>/</i>	<i>2,40</i>	<i>0,32</i>	<i>15,36</i>	<i>2,11</i>
<i>erreur standard</i>		<i>1,71</i>	<i>2,00</i>	<i>2,01</i>	<i>0,89</i>	<i>2,28</i>	<i>/</i>	<i>0,45</i>	<i>0,06</i>	<i>2,9</i>	<i>0,40</i>

A : taux d'argiles (%); LF : limons fins (%); LG : limons grossiers (%); SF : sables fins (%); SG : sables grossiers (%); CR%: capacité de rétention en eau (%); CaCO<sub>3</sub> : taux de calcaire total (%); MO : taux de matière organique (%). Textures : A : Argileuse ; L : Limoneuse ; S : Sableuse ; LA : Limono-argileuse ; AS : Argilo-sableuse ; LAS : Limono-argilo-sableuse.

Tableau 14 : moyennes des caractéristiques physiques et chimiques des quatre niveaux de sols sous pistachier de l'Atlas de la population de Sidi-Naamane.

Individus	A	LF	LG	LT	SF	SG	ST	Textures	CR	pH	CaCO <sub>3</sub>	MO
SN1 ♀ (a)	<b>33.33</b>	<b>26.74</b>	17.17	<b>43.91</b>	10.87	11.89	<b>22.76</b>	Limono-argileuse	38.73	8.50	<b>44.84</b>	6.88
SN2 ♂ (j)	33.57	19.00	<b>19.58</b>	38.59	14.45	13.40	27.84	Limono-argileuse	37.81	<b>8.77</b>	12.66	<b>8.41</b>
SN3 ♀ (j)	<b>45.23</b>	13.26	11.25	24.51	15.56	14.71	30.26	Argileuse	<b>39.94</b>	8.37	21.09	7.35
SN4 ♀ (j)	38.34	20.57	8.58	29.14	13.55	18.96	32.52	Limono-argileuse	38.63	<b>8.18</b>	29.38	7.99
SN5 ♂ (j)	40.29	19.03	10.72	29.75	16.87	13.09	29.96	Argileuse	36.92	8.55	16.72	7.51
SN6 ♂ (r.a) & SN7 ♂ (a)	35.62	<b>10.50</b>	<b>8.00</b>	<b>18.50</b>	<b>10.22</b>	<b>35.66</b>	<b>45.88</b>	Argilo-sableuse	37.64	8.34	<b>8.91</b>	7.93
SN8 ♀ (a)	40.91	13.46	14.31	27.77	19.52	<b>11.81</b>	31.32	Argileuse	<b>35.43</b>	8.45	13.13	<b>2.59</b>
<b>Moyennes</b>	<b>38.18</b>	<b>17.51</b>	<b>12.80</b>	<b>30.31</b>	<b>14.43</b>	<b>17.07</b>	<b>31.51</b>	<b>Limono-argileuse</b>	<b>37.87</b>	<b>8.45</b>	<b>20.96</b>	<b>6.95</b>

A: taux d'argiles (%); LF: limons fins (%); LG: limons grossiers (%); LT: limons totaux(%); SF: sables fins (%); SG: sables grossiers; ST: sables totaux(%); CaCO<sub>3</sub>: taux de calcaire total (%); CR: capacité de rétention en eau (%); MO%: taux de matière organique; j: jeune; r.a: relativement âgé; a: âgé.

### 1.3.1.2. Capacité de rétention en eau

La capacité de rétention en eau de ces sols dépasse dans tous les cas les 30%. Ainsi, la plus faible capacité est celle du niveau (60-80 cm) du sol du sujet SN5, avec quand même 32,93%. Le niveau (0-20 cm) du sol du sujet SN1 atteint allègrement le maximum enregistré, avec ses 43.14% de capacité de rétention en eau.

En moyenne (Tableau 14 et Fig. 39), c'est le sol du sujet SN3 qui a présenté la plus forte capacité de rétention en eau avec ses 39,94%, alors que le sol du sujet SN8 a la moins élevée avec ses 35,43%.

### 1.3.1.3. pH

Tous les niveaux de sol ont un pH supérieur à 8, excepté le niveau (0-20 cm) du sol du sujet SN8 avec son pH de 7,97. Notons que le niveau (40-60 cm) du sol du sujet SN2 a le pH le plus élevé avec 9,29. Ainsi et selon les normes d'appréciation consultées (Baize, 2000), il apparaît que tous ces sols sont basiques et même pour quelques un très basiques, comme les cas du niveau (20-40 cm) du sol SN1, les niveaux (20-40 cm) et (60-80 cm) du sol SN2 et en enfin le niveau (60-80 cm) du sol SN5.

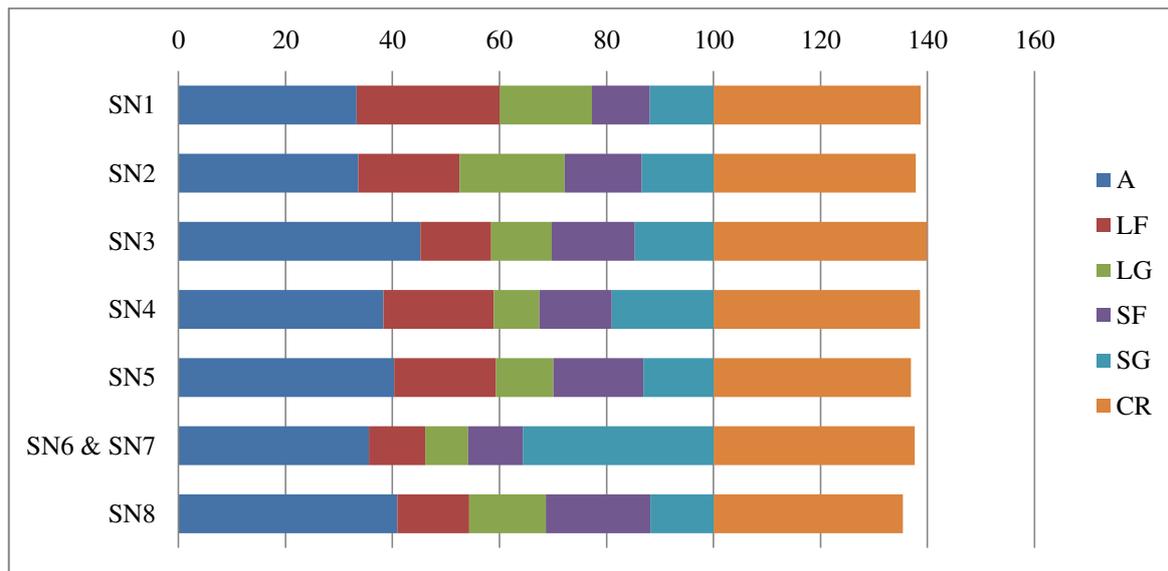


Fig. 39 : moyennes des constituants granulométriques et des capacités de rétention de chaque sol sous pistachier échantillonné à la station de Sidi-Naamane.

En moyenne (Tableau 14 et Fig. 40), le sol SN2 a le pH le plus élevé de tous les sols échantillonnés avec une valeur de 8,77. Le sol SN4 a relativement le pH le plus bas parmi nos échantillons avec ses 8,18.

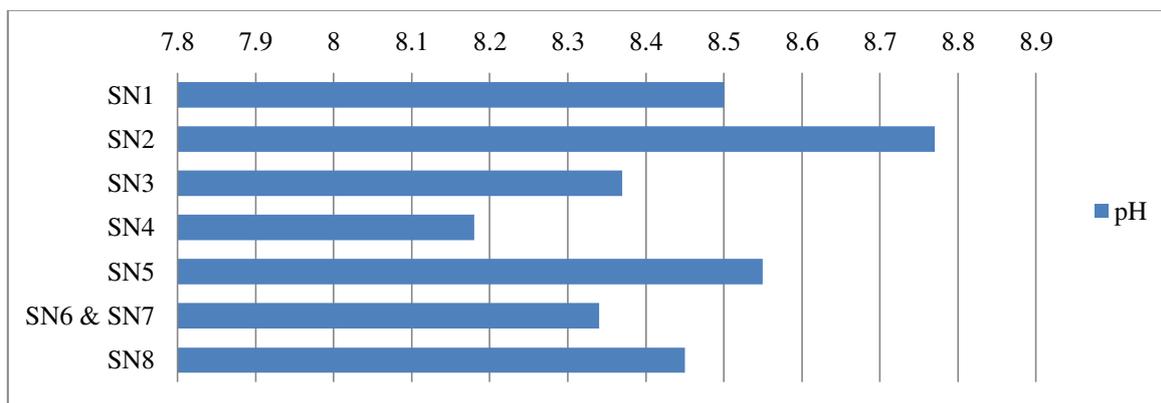


Fig. 40 : moyennes des pH des sols sous pistachier de l'Atlas échantillonnés à Sidi Naamane.

#### 1.3.1.4. Taux de calcaire total

Les taux de calcaire total des sols échantillonnés sont majoritairement élevés. Le niveau (40-60 cm) du sol du sujet SN1 est très fortement calcaire avec ses 66,88%, par contre le niveau (60-80) du sujet SN8 est peu calcaire avec ses 2,50%.

Ainsi et selon les normes d'appréciations considérées (Baize, 2000), ces sols sont dans leur ensemble modérément calcaires (20 échantillons / 28).

En moyenne (Tableau 14 et Fig. 41), le sol SN1 est le plus riche en calcaire total avec ses 44,84%. Les sols des sujets SN6 et SN7 en sont les moins pourvus, avec seulement 8,91%.

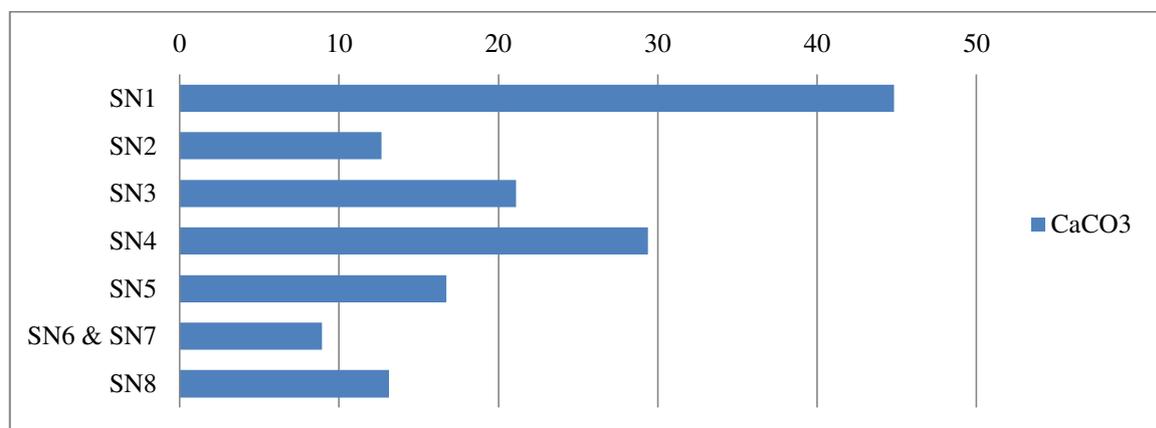


Fig. 41 : moyennes des teneurs en calcaire total des sols sous pistachier de l'Atlas échantillonnés à Sidi Naamane.

### 1.3.1.5. Taux de matière organique

Excepté le niveau (40-60 cm) du sol du sujet SN8, qui a présenté une teneur moyenne en matière organique (1,69%) et qui est par ailleurs la plus faible parmi les échantillons analysés, nous constatons que tous les niveaux de sols sous tous les sujets ont une teneur élevée, sinon très élevée en matière organique. Le niveau (0-20 cm) du sol des sujets SN6/SN7 en est le plus riche avec ses 10,37%.

En moyenne (Tableau 14 et Fig. 42), le sol SN2 est le plus riche en matière organique avec une teneur de 8,41%. Le sol SN8 est quant à lui le moins fourni avec ses 2,59%.

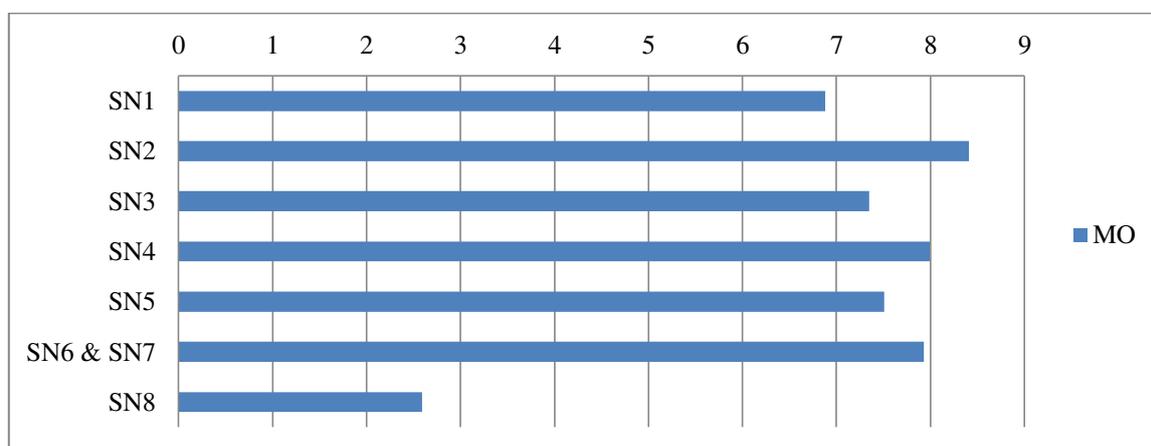


Fig. 42 : moyennes des teneurs en matière organique des sols sous pistachier de l'Atlas échantillonnés à Sidi Naamane.

### 1.3.2. Corrélations statistiques des variables pédologiques

Les tableaux des contingences statistiques (Tableau 15 et Tableau 16) montrent que les taux de limons fins sont positivement corrélés à celui du calcaire total, alors que les taux de limons grossiers sont positivement corrélés aux pH de ces sols.

Les taux de limons totaux sont quant à eux négativement corrélés à ceux des sables totaux.

Cependant, nous avons testé les évolutions et les corrélations des variables pédologiques dans le sens de la profondeur (suivant les 4 niveaux échantillonnés sous chaque pistachier de l'Atlas). Nous avons obtenus la figure 43.

Nous constatons que dans le sens de la profondeur :

- la capacité de rétention en eau des niveaux échantillonnés montre une forte tendance à diminuer ( $R^2 = 0.98$ ). Ce qui est aussi le cas des taux d'argiles ( $R^2 = 0.71$ ) et de matière organique ( $R^2 = 0.72$ ) ;

Tableau 15 : corrélations entre les variables pédologiques des échantillons de sols sous pistachier de l'Atlas de la station de Sidi Naamane (a).

	A	LF	LG	SF	SG	CR	pH	CaCO <sub>3</sub>	MO
A	1	-	-	-	-	-	-	-	-
LF	-0.49	1	-	-	-	-	-	-	-
LG	-0.46	0.47	1	-	-	-	-	-	-
SF	0.64	-0.26	0.11	1	-	-	-	-	-
SG	-0.20	-0.54	-0.63	-0.60	1	-	-	-	-
CR	0.07	0.24	-0.10	-0.53	0.06	1	-	-	-
pH	-0.38	0.22	<b>0.82</b>	0.19	-0.44	-0.26	1	-	-
CaCO <sub>3</sub>	-0.23	<b>0.83</b>	0.21	-0.37	-0.38	0.50	-0.20	1	-
MO	-0.32	0.22	-0.15	-0.64	0.34	0.66	0.04	0.10	1
<i>En gras, valeurs significatives (hors diagonale) au seuil alpha=0.05 (test bilatéral)</i>									
A : taux d'argiles (%) ; LF : limons fins (%) ; LG : limons grossiers (%) ; SF : sables fins (%) ; SG : sables grossiers (%) ; CaCO <sub>3</sub> : taux de calcaire total (%) ; CR : capacité de rétention en eau (%) ; MO : taux de matière organique (%).									

- le pH de ces sols tend à augmenter ( $R^2 = 0.59$ ) ;
- les taux de limons grossiers tendent plutôt à augmenter ( $R^2 = 0.36$ )
- les tendances évolutives des autres variables ne sont pas aussi affirmées, leurs coefficients de corrélations n'étant pas élevés.

Tableau 16: corrélations entre les variables pédologiques des échantillons de sols sous pistachier de l'Atlas de la station de Sidi Naamane (b).

	A	LT	ST	CR	pH	CaCO <sub>3</sub>	MO
A	1	-	-	-	-	-	-
LT	-0.56	1	-	-	-	-	-
ST	0.05	<b>-0.86</b>	1	-	-	-	-
CR	0.07	0.11	-0.17	1	-	-	-
pH	-0.38	0.57	-0.45	-0.26	1	-	-
CaCO <sub>3</sub>	-0.23	0.64	-0.63	0.50	-0.20	1	-
MO	-0.32	0.07	0.12	0.66	0.04	0.10	1
<i>En gras, valeurs significatives (hors diagonale) au seuil alpha=0.05 (test bilatéral)</i>							
A : taux d'argiles (%); LT : limons totaux (%); ST : sables totaux (%); CaCO <sub>3</sub> : taux de calcaire total (%); CR : capacité de rétention en eau (%); MO : taux de matière organique (%).							

### 1.3.3. Discussion

Les sols sous pistachier de l'Atlas échantillonnés à Sidi Naamane ont présenté une texture majoritairement argileuse à limono-argileuse. En effet, en moyenne 50% de leurs fractions granulométriques sont fines (taux des argiles + taux des limons fins), exception faite pour le sol sous pistachier l'Atlas des sujets SN6 et SN7. Les travaux de Tahrour (2005) dans une proche région (Oued Bésbès, wilaya de Médéa), ont révélé des textures moins fines, mais néanmoins 41% des échantillons sont à dominante limoneuse.

Ceux de Tisgouine (2010) effectués à Theniet el Had (wilaya de Tissemsilt), ont montré que 75% des sols sous pistachier de l'Atlas échantillonnés sont à dominante limoneuse et que 25% sont limono-sableux.

Les moyennes des capacités de rétention des sols échantillonnés à Sidi Naamane varient entre 35,43% et 39,94%. Tahrour (2005) a enregistré des capacités de rétention en eau des sols échantillonnés nettement plus élevées et comprises entre 32% et 69%.

Les moyennes des pH des sols échantillonnés à Sidi Naamane varient entre 8,18 et 8,77, donc considérées selon Baize (2000) comme des sols basiques à très basiques. Les résultats des travaux de Tahrour (2005) ont montrés des pH inférieurs à ceux de cette étude. En effet, ils se situent entre 7,26 et 7,90 et sont donc qualifiés de neutres à basiques. Les travaux de Tisgouine (2010) montrent des pH qui varient entre 6,65 et 7,54 et sont donc qualifiés de neutres.

Les moyennes des teneurs en calcaire total des sols échantillonnés à Sidi Naamane, varient entre 8,91% et 44,84%. Ces sols sont donc qualifiés selon Baize (2000) de modérément calcaire à fortement calcaires. Les sols échantillonnés par Tahrour (2005) ont montré des teneurs nettement plus inférieures et comprises entre 1,25% et 21,5% donc

considérés peu calcaires à modérément calcaires. Ceux de Tisgouine (2010) varient entre 7,18% et 34,37%, et sont ainsi qualifiés de modérément calcaires à fortement calcaires.

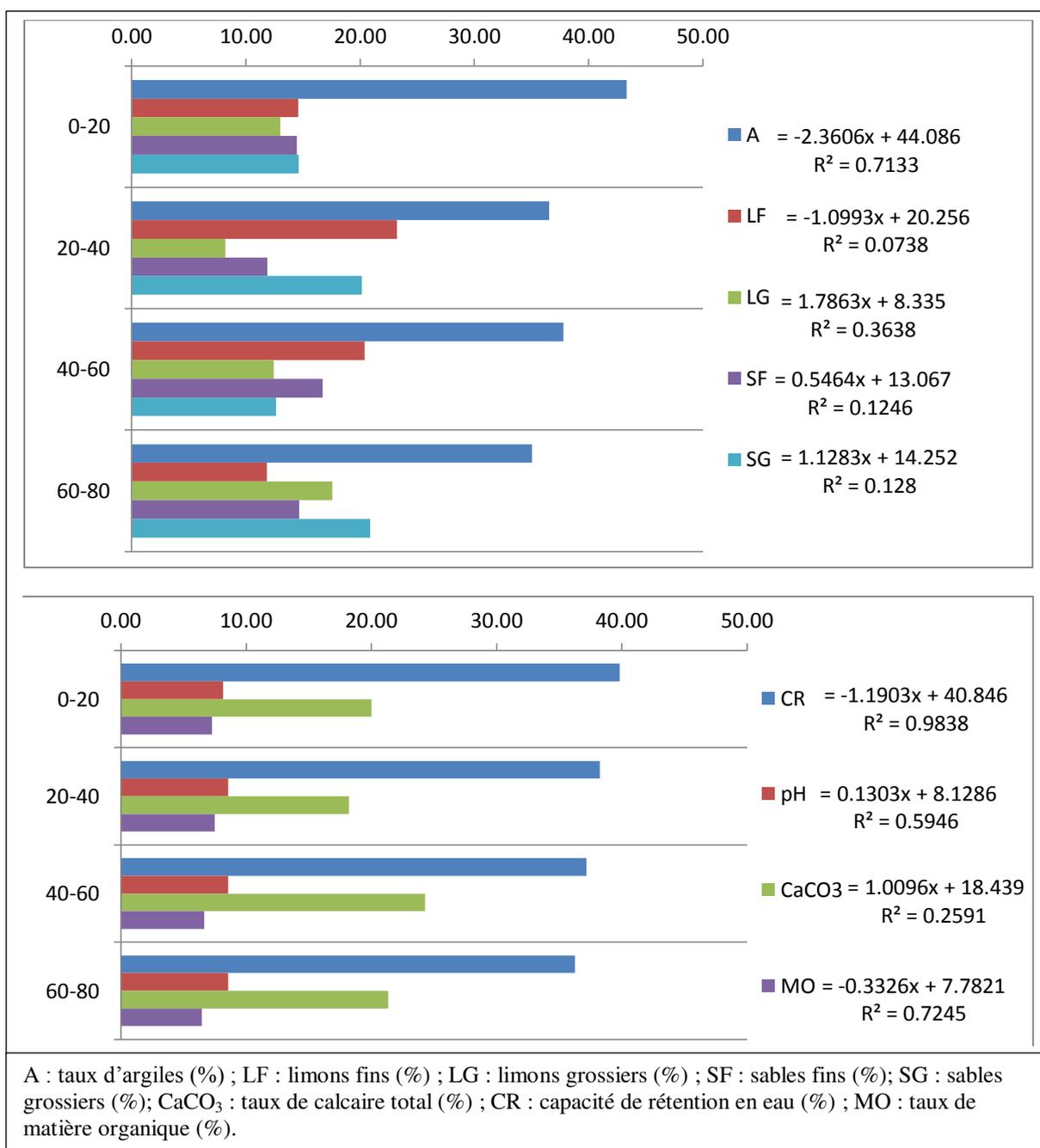


Fig. 43 : évolutions selon la profondeur, des variables pédologiques des sols échantillonnés à Sidi Naamane.

Les teneurs moyennes en matière organique des sols sous pistachier de l'Atlas de Sidi Naamane varient entre 2,59% (teneur moyenne) et 8,41% (teneur très élevée). Cette richesse en matière organique, et dans les quatre niveaux de chaque sol échantillonné, reflète le caractère isohumique des sols de cette station. Les travaux de Tisgouine (2010) ont montré

des teneurs variant entre 0,79% (extrêmement faible) et 5,02% (très élevée) des sols sous pistachier de l'Atlas de Theniet el Had, avec une moyenne de 3,28%.

Ainsi, les sols échantillonnés à Sidi Naamane ont majoritairement des niveaux superficiels riches en argiles et en matière organique, d'où une capacité de rétention en eau élevée de ces mêmes niveaux. Avec la diminution de leurs taux d'argiles et de matière organique en profondeur, leurs capacités de rétention diminuent conséquemment.

#### **1.4. Caractéristiques racinaires**

##### **1.4.1. Résultats**

Les différentes mesures dendrométriques obtenues directement des systèmes racinaires excavés (Fig. 44) sont consignées dans le tableau 16.

Nous y constatons que le sujet SN7 a le plus de racines superficielles (16) par rapport à l'échantillon considéré, alors que le sujet SN8 est celui qui en a le moins avec seulement 5 racines superficielles. Il est pour le moins évident dans ce cas que le même sujet SN7 a développé le plus de longueurs racinaires superficielles avec ses 2253 cm et que le sujet SN8 en a développé le moins de l'échantillon avec seulement 664 cm.

Selon les classes d'âge relatifs calculées précédemment, il est intéressant de signaler que ces deux individus (SN7 et SN8) sont considérés parmi les plus âgés de l'échantillon (en plus de SN1). Malgré cette similitude d'âge, ils ont développé des architectures racinaires très différentes. Les racines superficielles les plus épaisses sont celles du troisième sujet âgé, le sujet SN1, avec en moyenne 23,17 cm de circonférence ; tandis que celles du sujet SN8, tout aussi âgé, sont les plus fines avec 17,5 cm de circonférence. De plus, ce même sujet SN8 a les racines superficielles les moins ramifiées (22 ramifications), alors que le sujet SN4 a les plus ramifiées de l'échantillon avec ses 332 ramifications.

Quant aux racines profondes, il n'y a que les sujets âgés SN1 et SN8 qui en ont émis, le reste, nous n'en n'avons pas observé. Des deux, même si SN1 a plus de racines profondes que SN8, il faut dire que SN8 totalise une longueur presque égale à celle développée par SN1. Les racines profondes du sujet SN8 sont plus épaisses que celles de SN1 (24,14 cm contre 15,16 cm) mais de loin moins ramifiées que celles de SN1 (9 contre 42).

Pour une meilleure lisibilité de ces résultats, nous avons choisi de les pondérer en procédant à leur transformation en pourcentage, ce qui a donné les résultats du tableau 17.



Fig. 44: excavation unilatérale des systèmes racinaires des sujets échantillonnés de la population de Sidi Naamane (Avril, 2010) (Photos : Limane).

Tableau 16b: résultats des mesures racinaires des individus échantillonnés à Sidi Naamane

Sujets	RS	LTRS (cm)	CMRS (cm)	RRS	RP	LTRP (cm)	CMRP (cm)	RRP
SN1 ♀ (a)	11	916	<b>23.17</b>	78	6	339	15.16	42
SN2 ♂ (j)	15	1439	22.9	81	0	0	0	0
SN3 ♀ (j)	10	2132.5	17.77	108	0	0	0	0
SN4 ♀ (j)	13	1937	13.83	<b>332</b>	0	0	0	0
SN5 ♂ (j)	9	1873.13	16.27	113	0	0	0	0
SN6 ♂ (r.a)	9	1393	20.36	67	0	0	0	0
SN7 ♂ (a)	<b>16</b>	<b>2253</b>	22.28	80	0	0	0	0
SN8 ♀ (a)	<b>5</b>	<b>664</b>	<b>17.5</b>	<b>22</b>	4	340	24.14	9

RS : nombre de racines superficielles ; RP : nombre de racines profondes ; LTR : longueur totale des racines (S : superficielles ; P : profondes); CMR : circonférences moyennes des racines (S : superficielles ; P : profondes) ; RR : nombre des ramifications des racines (S : superficielles ; P : profondes) ; j : jeune ; r.a : relativement âgé. a : âgé.

Tableau 17 : résultats des mesures racinaires (%) des individus échantillonnés à Sidi Naamane

Racines superficielles	RS	LTRS (cm)	CMRS (cm)	RRS
Mesures brutes	88	12607.63	19.26	881
%	89.80	94.89	49.50	94.53
Racines profondes	RP	LTRP (cm)	CMRP (cm)	RRP
Mesures brutes	10	679	19.65	51
%	10.20	5.11	50.50	5.47
Totaux	NTR	LTR	CMR	RTR
Mesures brutes	98	13286.6	38.91	932
%	100	100	100	100

RS : nombre de racines superficielles ; RP : nombre de racines profondes ; NTR : nombre total de racines ; LTR : longueur totale des racines (S : superficielles ; P : profondes); CMR : circonférences moyennes des racines (S : superficielles ; P : profondes) ; RR : nombre des ramifications des racines (S : superficielles ; P : profondes).

Au vu de ces résultats, nous constatons que sur un total de 98 racines échantillonnées, 89,8% sont des racines superficielles, le reste (10,2%) sont des racines profondes. Les racines superficielles constituent 94,89% du total des longueurs racinaires, et 94,53% des ramifications enregistrées, alors que les racines profondes ne constituent que 5,11% des longueurs racinaires et à peine 5,47% des ramifications. Par contre, nous constatons que leurs circonférences moyennes sont presque égales.

#### 1.4.2. Corrélations statistiques des variables racinaires

Le tableau 18 montre les résultats des tests de corrélation de Pearson appliqués aux variables racinaires des pistachiers de l'Atlas de la station de Sidi Naamane.

Tableau 18 : test de corrélation de Pearson appliqué aux variables racinaires des pistachiers de l'Atlas de la station de Sidi Naamane.

	RS	LTRS	CMRS	RRS	RP	LTRP	CMRP	RRP
RS	1	-	-	-	-	-	-	-
LTRS	0.57	1	-	-	-	-	-	-
CMRS	0.40	-0.24	1	-	-	-	-	-
RRS	0.33	0.46	-0.63	1	-	-	-	-
RP	-0.40	<b>-0.80</b>	0.29	-0.35	1	-	-	-
LTRP	-0.52	<b>-0.85</b>	0.19	-0.40	<b>0.97</b>	1	-	-
CMRP	-0.61	<b>-0.85</b>	0.07	-0.42	<b>0.88</b>	<b>0.97</b>	1	-
RRP	-0.15	-0.61	0.42	-0.22	<b>0.92</b>	<b>0.80</b>	0.62	1
<i>En gras, valeurs significatives (hors diagonale) au seuil alpha=0.05 (test bilatéral)</i>								
RS : nombre de racines superficielles ; RP : nombre de racines profondes ; LTR : longueur totale des racines (S : superficielles ; P : profondes) ; CMR : circonférences moyennes des racines (S : superficielles ; P : profondes) ; RR : nombre des ramifications des racines (S : superficielles ; P : profondes).								

La longueur totale des racines superficielles est négativement corrélée au nombre, à la longueur totale et aux circonférences moyennes des racines profondes. Le nombre de ces dernières montre une corrélation positive avec la longueur totale, les circonférences moyennes et le nombre de ramifications des racines profondes.

La longueur totale des racines profondes est positivement corrélée à leur circonférence moyennes et au nombre de leur ramifications.

### 1.4.3. Conclusions

Il apparaît ainsi que les systèmes racinaires des individus échantillonnés sont principalement de type superficiel, c'est-à-dire, la majorité de leurs racines sont situées dans les 50 premiers centimètres du sol. Peu de racines plongeantes en profondeur (au-delà des 50 cm) sont émises, auquel cas elles le furent chez deux sujets.

Cependant, il est intéressant de constater que les deux seuls sujets ayant développés des racines profondes sont des femelles âgées, le mâle âgé de l'échantillon n'en n'a pas émis. De là à conclure une corrélation entre le sexe et le type de système racinaire n'est pas évident, il faudrait augmenter l'effectif des différentes classes de cet échantillon pour tirer des conclusions significatives.

Les tests de corrélations statistiques nous montrent qu'il y a une forme de coordination entre les différents types de racines et de leurs caractéristiques de ces mêmes systèmes racinaires. En effet, selon ces résultats, quand le nombre de racines profondes augmente, d'une part elles s'allongent, s'épaississent et se ramifient, mais d'autre part cela se fait principalement « au détriment » des longueurs des racines superficielles. Ainsi, le système

racinaire redistribuée (allouée) de la biomasse entre les différents niveaux (superficiel et profond) en fonction des exigences de sa survie.

## 1.5. Interaction sol / système racinaire

### 1.5.1. Résultats

Les résultats des tests de corrélation de Pearson confrontant les variables pédologiques et celles racinaires sont contenus dans le tableau 19.

Ils montrent que statistiquement le taux de matière organique des sols échantillonnés est la variable la plus significativement corrélée, d'une part positivement avec le nombre de racines superficielles et d'autre part négativement avec les longueurs totales des racines profondes et leurs circonférences moyennes.

Tableau 19: test de corrélation de Pearson appliqué aux variables pédologiques et racinaires de la station de Sidi Naamane.

	A	LF	LG	LT	SF	SG	ST	CR	pH	CaCO <sub>3</sub>	MO
RS	-0.52	0.12	0.01	0.08	-0.60	0.34	0.17	0.45	0.07	0.01	<b>0.76</b>
LTRS	0.28	-0.30	-0.60	-0.49	-0.25	0.39	0.38	0.50	-0.34	-0.23	0.67
CMRS	-0.69	0.04	0.48	0.26	-0.55	0.23	0.07	0.07	0.52	-0.02	0.20
RRS	0.10	0.33	-0.37	0.03	-0.10	-0.03	-0.08	0.42	-0.54	0.36	0.41
RP	-0.22	0.51	0.52	0.58	0.08	-0.44	-0.52	-0.19	0.15	0.62	-0.61
LTRP	-0.11	0.38	0.50	0.48	0.24	-0.45	-0.47	-0.35	0.13	0.48	<b>-0.77</b>
CMRP	0.02	0.20	0.44	0.35	0.40	-0.44	-0.38	-0.51	0.11	0.29	<b>-0.90</b>
RRP	-0.38	0.68	0.50	0.68	-0.22	-0.36	-0.54	0.11	0.15	<b>0.79</b>	-0.25
<i>En gras, valeurs significatives au seuil alpha=0.05 (test bilatéral)</i>											
A: taux d'argiles (%); LF : limons fins (%); LG : limons grossiers (%); LT : limons totaux (%); SF : sables fins (%); SG : sables grossiers (%); ST : sables totaux (%); CR : capacité de rétention en eau (%); CaCO <sub>3</sub> : taux de calcaire total (%); MO : taux de matière organique (%); RS : nombre de racines superficielles; RP : nombre de racines profondes; CMR : circonférences moyennes des racines (S : superficielles; P : profondes); RR : nombre des ramifications des racines (S : superficielles; P : profondes).											

Le nombre de ramification des racines profondes montre une forte corrélation avec la teneur des sols en calcaire total.

Afin de visualiser les corrélations dans leur ensemble entre les nombreuses variables confondues, il est nécessaire de montrer leur contribution dans l'hyperespace statistique grâce à une ACP (Fig. 45).

Les deux axes F1 et F2 expliquent 64% de l'inertie constatée. Selon l'axe F1, nous pouvons discerner deux ensembles A et B.

L'ensemble A montre l'affinité des taux de matière organique avec la capacité de rétention en eau des sols. Les taux de sables grossiers semblent suivre de loin ce duo.

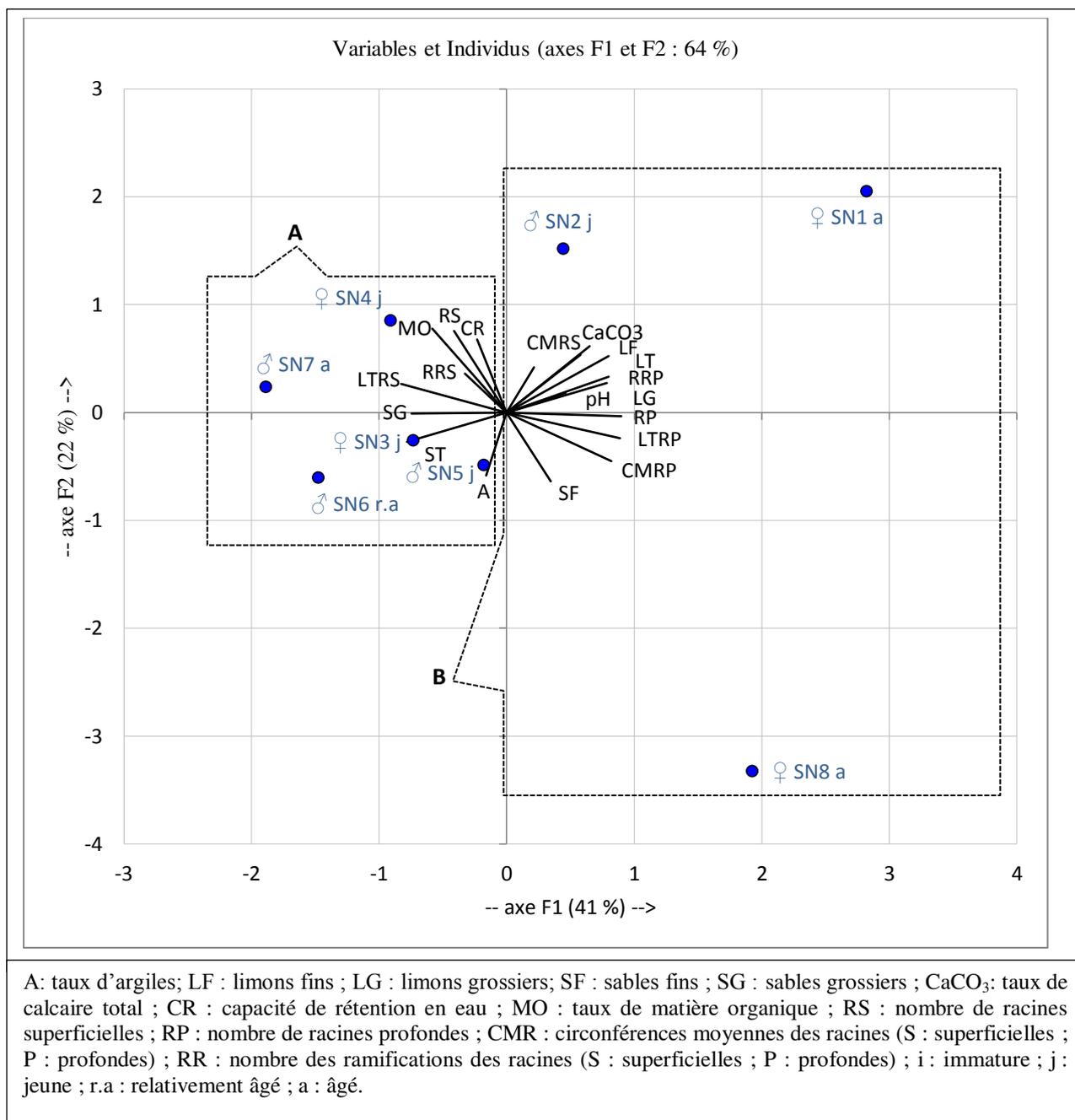


Fig. 45 : ACP confrontant les variables pédologiques et racinaires des individus échantillonnés à Sidi Naamane.

Les systèmes racinaires investissent dans le nombre de racines superficielles, leurs longueurs et leurs ramifications. C'est le cas des individus SN7, SN4, SN6, SN3 et SN5 qui ont investi exclusivement dans les racines superficielles. Cependant, les sujets SN3 et SN5 ayant des sols à texture argileuse ont cette tendance à suivre clairement cette variable et

s'écarter du groupe précédent. Par ailleurs, les individus s'inscrivant dans cet ensemble comportent autant de mâles que de femelles et toutes les classes d'âge.

L'ensemble B montre l'agrégation des variables : taux des limons fins, des limons grossiers, de calcaire total et des pH des sols. Ces variables pédologiques influent positivement sur le nombre de racines profondes et leurs caractéristiques (longueurs totales, circonférences moyennes et nombre de ramifications), mais aussi sur les circonférences moyennes des racines superficielles.

Par ailleurs, il est intéressant de signaler que cet ensemble comporte des individus estimés âgés (SN1 et SN8), toutes deux des femelles, et un jeune mâle SN2 qui se rapproche plutôt de l'ensemble A, mais que la richesse de son sol en limons grossiers et le pH élevé tirent vers l'ensemble B.

### **1.5.2. Discussion**

Sidi Naamane se situe selon le climagramme d'Emberger dans l'étage bioclimatique subhumide tempéré, la pluviométrie y est, toute proportion gardée, encore relativement importante avec 627,5 mm/an. Par conséquent, la pédogenèse y est relativement évoluée. Les niveaux superficiels ont montré une texture fine et riche en matière organique, leur capacité de rétention en eau s'en trouve par conséquent élevée. Nous déduisons que la réserve utile de ses niveaux est vraisemblablement intéressante pour le pistachier de l'Atlas (comme d'ailleurs pour les autres végétaux). Ainsi, les individus de cette station allouent la majorité de leur biomasse racinaire dans l'élaboration de racines superficielles longues et ramifiées.

En effet, selon Schenk et Jackson (2002b), le système racinaire superficiel est généralement favorisé au détriment du système racinaire profond parce que (i) le coût énergétique pour sa construction et sa maintenance sont moindres pour les racines superficielles (Adiku et al., 2000) ; (ii) les niveaux superficiels des sols sont en général moins sujets à une déficience oxygénique (Hillel, 1998 ; Schenk et Jackson, 2002a). Selon Lynch (1995), ces sols en surface tendent à être plus riches en nutriments, mais sont plus secs et plus exposés aux températures extrêmes comparés aux sols en profondeur. Selon Raimbault (2003), les racines superficielles ont une activité intense d'absorption hydrominérale au printemps, et à l'automne, elles assurent l'essentiel de la pousse et des réserves. Cependant, ces mêmes niveaux certes se réchauffent rapidement au printemps mais se refroidissent rapidement à l'automne, sont trop chauds et trop secs en été et trop froids en hiver.

Considérant les résultats de l'ACP (Fig. 45), nous constatons que la majorité des individus échantillonnés (ensemble A) investissent principalement dans l'élaboration d'une biomasse racinaire superficielle conséquente, qui paraît être suffisante pour pourvoir aux besoins de cette espèce, dans ces sols à forte capacité de rétention en eau. Nous constatons par

ailleurs dans cet ensemble, qu'il y a la majorité des jeunes individus (SN3, SN4 et SN5) mâles et femelles confondus, l'individu relativement âgé (SN6) et un individu âgé (SN7). Ce qui veut dire que ces architectures racinaires ne sont pas dépendantes de l'âge ni apparemment du sexe, du moins pour cette station. Ainsi, tant que les conditions édaphiques le permettent, les individus quel que soient leurs âges et leur sexe, optent préférentiellement pour un système racinaire superficiel énergétiquement moins coûteux.

A l'opposé (ensemble B), quand les conditions édaphiques ne favorisent pas une bonne capacité de rétention en eau des niveaux superficiels des sols, notamment par la diminution de leurs taux d'argiles et de matière organique, l'eau y tend à percoler vers les profondeurs. Le peu d'individus concernés par ces conditions dans cet échantillon, en l'occurrence les individus SN1 et SN8 tous deux considérés âgés, ont alloué une partie de leurs biomasses racinaires à l'élaboration de nombreuses racines profondes (et par extension leurs caractéristiques), ce qui leur permet de prospecter les niveaux profonds de leurs sols sous-jacents, surtout pendant la période sèche qui dure les 4 mois de l'année dans cette station.

Schenk et Jackson (2002b) ont émis l'hypothèse que « les racines ne croissent aussi profondément que lorsque la nécessité d'acquisition des ressources l'exige ». L'échantillon de Sidi Naamane semble s'accommoder de cette hypothèse. En effet, ni l'âge ni le sexe ne semblent influencer sur l'orientation de l'architecture des systèmes racinaires des individus. Il semble que seules les conditions pédologiques de l'environnement racinaire les façonnent. Quand ces conditions favorisent une bonne rétention des humidités dans les niveaux superficiels, le système racinaire colonise ces niveaux au rapport coûts/bénéfices certainement avantageux ; l'architecture exprimée est ainsi de type superficiel. Autrement, si ces niveaux superficiels sont moins rétenteurs, le système racinaire, en plus d'un réseau racinaire superficiel, investit dans des racines profondes au demeurant coûteuses, mais indubitablement vitales pour le pourvoi en ressources hydrominérales pendant les mois de sécheresse. S'installe ainsi un système racinaire de type généralisé.

## **2. Daya d'el-Mergueb (M'sila)**

### **2.1. Caractéristiques des individus échantillonnés**

Les principales caractéristiques des pistachiers de l'Atlas échantillonnés dans la daya d'el-Mergueb sont illustrées par le tableau 19b.

L'échantillon comporte autant de mâles que de femelles, cependant un très jeune individu immature fait partie de l'effectif.

Tableau 19b : caractéristiques des pistachiers de l'Atlas échantillonnés dans la daya d'el-Mergueb.

Stations et coordonnées	Code des Individus	Sexe	Hauteur (m)	Circonférence du tronc (cm)	Diamètre de couronne (m)
Daya d'el-Mergueb 35° 33 .177 N 03° 56.214 E Alt.584 (m)	ME1	M	3	85	4.35
	ME2	F	7	130	9.3
	ME3	F	7	178.52	7.86
	ME4	F	7	107	5.7
	ME5	M	2.5	38	1.75
	ME6	i	0.5	2.55	0.4
	ME7	M	3	75	4.5

ME<sub>n</sub> : sujet n d'el-Mergueb ; M : mâle ; F : femelle ; i : immature.

## 2.2. Estimation des classes d'âges relatifs des individus échantillonnés à el Mergueb

Par le biais de la méthode de Liorzou (1956), nous avons obtenu les résultats suivants pour cette population (Tableau 20).

Tableau 20 : classes des circonférences des troncs et âges relatifs des individus échantillonnés dans la daya d'el-Mergueb.

$X_{i\ min}$		2.5	Classes		n	Code individu	Classe d'âge/ (symbole)
$X_{i\ max}$		178.5	1	[0 – 59 [	2	ME5, ME6	Très jeune / (t.j)
Etendue de la classe	<i>d</i>	176	2	[59 – 118 [	3	ME1, ME4, ME7	Jeune / (j)
Nombre de classes	<i>k</i>	4	3	[118– 177[	1	ME2	Relativement Agé / (r.a)
Amplitude d'une classe	<i>a</i>	59	4	[177-236[	1	ME3	Âgé / (a)
Borne inférieure de la 1 <sup>ère</sup> classe	<i>Li</i>	0	Total		7	7	4
Borne supérieure de la 1 <sup>ère</sup> classe	<i>Ls</i>	59					

Les résultats obtenus montrent que l'échantillon de la population d'el-Mergueb est constitué de 4 classes de circonférence de tronc. Nous considérons par analogie que la première classe est celle des très jeunes individus, elle renferme les individus ME5 et ME6. La 2<sup>ème</sup> classe est celle des individus jeunes, elle renferme les sujets ME1, ME4 et ME7. La 3<sup>ème</sup> classe comporte les individus relativement âgés représentés par le seul individu ME2. Et enfin, la 4<sup>ème</sup> classe renfermant le seul sujet ME3 qui représente les sujets estimés âgés.

## 2.3. Caractéristiques pédologiques des sols sous pistachiers de l'Atlas échantillonnés

### 2.3.1. Résultats

Les résultats des analyses physiques et chimiques des sols sous pistachier de l'Atlas de cette station sont présentés dans deux tableaux. Le premier (Tableau 21) contient les résultats

détaillés obtenus pour les quatre niveaux de chaque profil pédologique réalisé sous chaque pistachier de l'Atlas échantillonné. Le tableau 22 contient les moyennes des quatre niveaux de sol pour chaque sujet échantillonné.

Cependant, il faut signaler d'emblée que la majorité des sols échantillonnés sont des sols de « nebkhas ». Seul le sol du sujet ME2 fait exception, il a été échantillonné dans ladite daya mais en dehors de ces accumulations.

#### **2.3.1.1. Texture**

Les résultats obtenus ont montré que le niveau (20-40 cm) du sol ME3 est le plus riche en argiles avec 28.89%, tandis que le niveau (40-60 cm) du sol ME4 en est le plus pauvre avec seulement 0.83%.

Le sol ME2 est en même temps le sol le plus riche en limons grossiers avec les 41.14% du niveau (0-20 cm) et en limons fins avec les 46.98% de son niveau (20-40 cm). Les valeurs les plus faibles de ces deux composantes ont été enregistrées respectivement dans le niveau (40-60 cm) du sol des sujets ME5 et ME6 avec leurs 0,05% et dans le niveau (40-60 cm) du sol ME3 avec ses 0.12%.

Quant aux sables, le sol ME4 contient le niveau le plus riche en sables fins avec 71.37% de son niveau (0-20 cm) et le niveau le plus faible en sables grossiers avec les 3.89% de son niveau (40-60 cm). Le sol ME2 a le niveau le plus pauvre en sables fins avec 0.46% de son niveau (0-20 cm), alors que le niveau (40-60 cm) du sol des sujets ME5 et ME6 en contient le plus, avec ses 56.03%.

Du point de vue texture, il apparaît que les sols de la daya d'el Mergueb sont majoritairement limoneux avec trois variantes selon les niveaux : limono-argileuse (LA), limoneuse fine (LF) et limono-sableuse (LS). Mais nous trouvons quelques niveaux sablo-limoneux (SL) et autres limono-argilo-sableux (LAS).

En moyenne (Tableau 22 et Fig. 46), la fraction fine (A + LF) représente 22,77% du total des fractions granulométriques des sols échantillonnés. Le sol sous pistachier du sujet ME2 a présenté la plus forte teneur en limons grossiers, en limons totaux, en sables fins et en sables totaux (18,91%, 38,53% et 31,93% respectivement). Le sol du sujet ME3 est le plus riche en argiles (20,29% en moyenne) alors que le sol du sujet ME4 est le plus riche en sables fins (56,16%). Le taux le plus élevé en sables fins et en sables totaux se retrouve dans le sol du sujet ME7 (40,93% et 77,49% respectivement).

#### **2.3.1.2. Capacité de rétention en eau**

Les capacités de rétention dépassent dans tous les échantillons les 20% de leurs poids. Le niveau le plus rétenteur en eau est le (0-20 cm) du sol ME2 avec 31,67%, tandis que le moins rétenteur en eau est le niveau (60-80 cm) du sol ME4, avec 21,82% de son poids.

Tableau 21 : caractéristiques physiques et chimiques des sols sous pistachier de la daya d'el-

Sol	Niveaux (cm)	A	LF	LG	SF	SG	Texture	CR	pH	CaCO <sub>3</sub>	MO
ME1 <i>nebkha</i>	0-20	2.89	13.97	41	2.59	39.55	LF	25.83	7.79	23.75	2.12
	20-40	4.84	22.34	2.83	43.19	26.8	LS	28.56	7.65	27.50	3.60
	40-60	7.34	24.47	0.51	49.73	17.95	LS	30.85	<b>7.59</b>	<b>34.38</b>	1.90
	60-80	5.52	27.64	1.06	36.48	29.3	LS	23.70	7.71	6.25	2.43
ME2	0-20	7.68	15.37	<b>41.14</b>	<b>0.46</b>	35.35	LF	<b>31.67</b>	7.73	28.13	2.43
	20-40	1.44	<b>46.98</b>	3.89	30.35	17.34	LF	29.62	8.02	25.63	3.23
	40-60	1.03	10.38	10.28	50.26	28.05	LF	27.61	<b>8.38</b>	19.38	4.81
	60-80	8.48	5.75	20.34	46.65	18.78	LS	24.78	8.29	10.00	4.23
ME3 <i>nebkha</i>	0-20	23.86	7.84	1.27	49.78	17.25	LS	24.76	7.92	24.38	1.64
	20-40	<b>28.89</b>	28.17	9	22.39	11.55	LA	22.87	7.69	25.63	4.60
	40-60	9.27	<b>0.12</b>	4.63	53.2	32.78	SL	23.52	7.79	14.38	4.34
	60-80	19.15	12.76	1.07	38.94	28.08	LS	22.39	7.77	16.25	4.92
ME4 <i>nebkha</i>	0-20	5.51	7.54	1.66	<b>71.37</b>	13.92	SL	26.72	7.89	5.63	4.87
	20-40	3.21	6.43	2.55	60.58	27.23	SL	23.95	7.84	5.00	<b>1.11</b>
	40-60	<b>0.83</b>	7.78	34.14	53.36	<b>3.89</b>	LS	23.88	7.69	6.88	2.70
	60-80	5.73	20.48	4.96	39.33	29.5	LS	<b>21.82</b>	7.71	6.25	2.12
ME5 & ME6 <i>nebkha</i>	0-20	8.32	5.55	4.55	52.72	28.86	SL	25.78	7.87	<b>3.13</b>	3.91
	20-40	18.91	5.4	2.22	47.54	25.93	LS	24.61	8.01	5.00	2.06
	40-60	10.98	8.23	<b>0.05</b>	24.71	<b>56.03</b>	SL	24.33	7.89	5.63	2.96
	60-80	21.85	19.12	0.58	14.2	44.25	LAS	24.73	7.82	6.25	2.70
ME7 <i>nebkha</i>	0-20	9.45	3.93	1.56	46.55	38.51	SL	24.49	7.86	7.50	5.08
	20-40	1.41	2.54	25.44	15.25	55.36	LS	25.18	8.15	5.63	<b>5.45</b>
	40-60	27.2	2.5	4.47	41.35	24.48	LAS	26.08	8.20	5.00	2.54
	60-80	5.33	2.15	4.06	43.11	45.35	SL	25.35	8.26	6.88	3.01
<i>Moyennes</i>		9.89	12.17	9.08	39.24	29.63	/	25.40	7.89	13.06	3.29
<i>Ecart type</i>		8.55	11.08	12.95	17.75	13.00	/	2,53	2.53	9.8	1.25
<i>Erreur standard</i>		1.75	2.26	2.64	3.62	2.65	/	0,52	0.52	2	0.26

A: taux d'argiles (%); LF : limons fins (%); LG : limons grossiers (%); LT : limons totaux (%); SF : sables fins (%); SG : sables grossiers (%); ST : sables totaux (%); CaCO<sub>3</sub> : taux de calcaire total (%); CR : capacité de rétention en eau (%); MO : taux de matière organique (%).

Tableau 22 : moyennes des résultats d'analyses pédologiques des sols sous pistachier de la population d'el-Mergueb.

Individus	A	LF	LG	LT	SF	SG	ST	Texture	CR	pH	CaCO <sub>3</sub>	MO
ME1 ♂ (j) <i>nebkha</i>	5.15	<b>22.11</b>	11.35	33.46	33	28.4	61.4	Limono-sableuse	27.24	<b>7.69</b>	<b>22.97</b>	<b>2.51</b>
ME2 ♀ (r.a)	4.66	19.62	<b>18.91</b>	<b>38.53</b>	<b>31.93</b>	24.88	<b>56.81</b>	Sablo-limoneuse	<b>28.42</b>	8.10	20.79	3.68
ME3 ♀ (a) <i>nebkha</i>	<b>20.29</b>	12.22	3.99	16.22	41.08	22.42	63.49	Sablo-argilo-limoneuse	<b>23.38</b>	7.79	20.16	3.87
ME4 ♀ (j) <i>nebkha</i>	<b>3.82</b>	10.56	10.83	21.39	<b>56.16</b>	<b>18.64</b>	74.80	Limono-sableuse	24.09	7.78	5.94	2.70
ME5 ♂ (t.j) & ME6 i (t.j) <i>nebkha</i>	15.02	9.58	<b>1.85</b>	<b>11.43</b>	34.79	38.77	73.56	Sablo-limoneuse	24.86	7.89	<b>5.00</b>	2.91
ME7 ♂ (j) <i>nebkha</i>	10.85	<b>2.78</b>	8.88	11.66	36.57	<b>40.93</b>	<b>77.49</b>	Sablo-limoneuse	25.28	<b>8.11</b>	6.25	<b>4.02</b>
<b>Moyennes</b>	<b>9.96</b>	<b>12.81</b>	<b>9.30</b>	<b>22.11</b>	<b>33.29</b>	<b>25.58</b>	<b>67.93</b>	<b>Limono-sableuse</b>	<b>25.40</b>	<b>7.89</b>	<b>13.06</b>	<b>3.29</b>

A : taux d'argiles (%); LF : limons fins (%); LG : limons grossiers (%); LT : limons totaux (%); SF : sables fins (%); SG : sables grossiers (%); ST : sables totaux (%); CR : capacité de rétention en eau (%); CaCO<sub>3</sub> : taux de calcaire total (%); MO : taux de matière organique (%); i : immature; t.j : très jeune; j : jeune; r.a : relativement âgé; a : âgé.

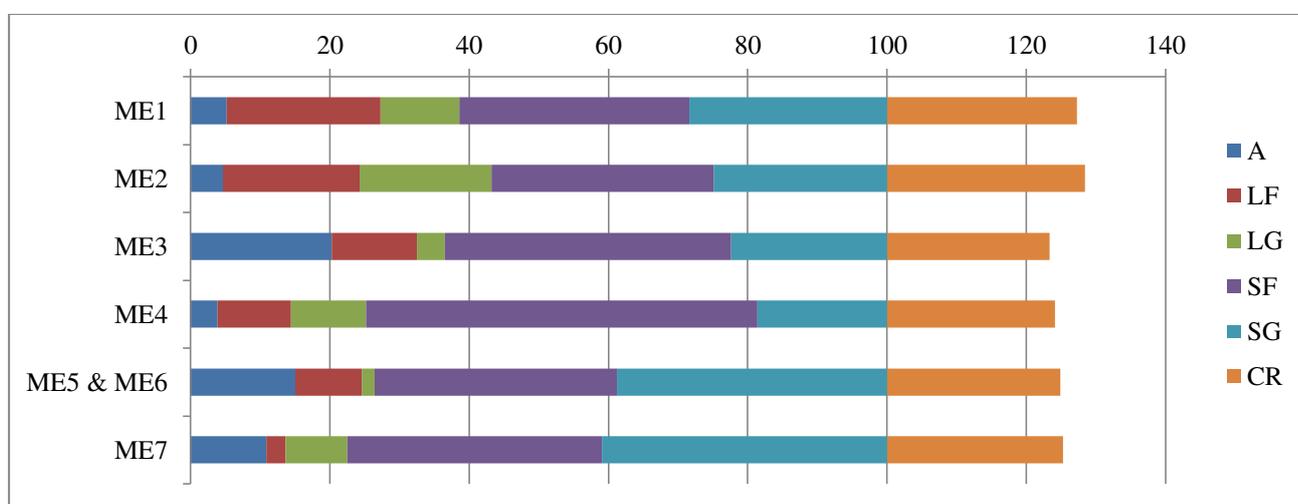


Fig. 46 : moyennes des constituants granulométriques et des capacités de rétention de chaque sol sous pistachier de l'Atlas échantillonné à la daya d'el-Mergueb.

### 2.3.1.3. pH

Tous les niveaux des sols échantillonnés ont un pH supérieur à 7,5. Ils sont ainsi pour le moins basiques. Le niveau (40-60 cm) du sol ME2 a montré le pH le plus élevé avec 8,38, tandis que le niveau (40-60 cm) du sol ME1 a présenté le pH le plus faible des échantillons analysés avec 7,59.

En moyenne (Tableau 22 et Fig. 47), ces sols ont un pH de 7,89. Le plus élevé étant le sol de ME7 avec un pH de 8,11 et le plus bas celui du sol de ME1 avec un pH de 7,69.

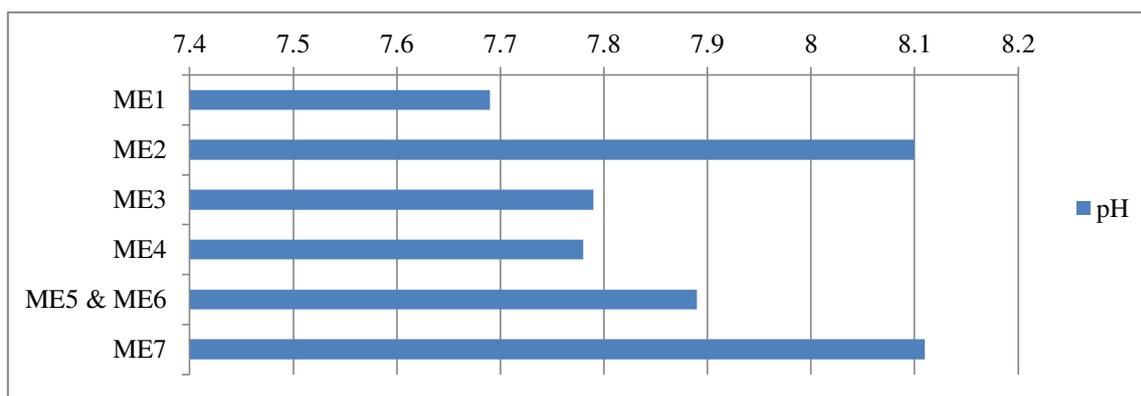


Fig. 47 : moyennes des pH de chaque sol sous pistachier de l'Atlas échantillonné de la daya d'el-Mergueb.

### 2.3.1.4. Taux de calcaire total

Il se situe entre un minimum de 3,13% (donc peu calcaire) retrouvé dans le niveau (0-20) du sol des sujets ME5 et ME6, et un maximum de 34,38% (donc fortement calcaire) du niveau (40-60) du sol ME1. Cependant, la majorité de ces niveaux (20 échantillons /24) sont modérément calcaires selon les normes d'appréciations considérées (Baize, 2000).

En moyenne (Tableau 22 et Fig. 48), les sols sous pistachier de cette daya ont une teneur en calcaire total estimée à 13,06%. Le sol de ME1 en est le plus fourni avec 22,97% en moyenne, alors que le sol de ME5 et ME6 en est le moins avec 5% en moyenne.

### 2.3.1.5. Taux de matière organique

Nous constatons que tous les niveaux de tous les sols en sont pourvus. Dans leur majorité (13 échantillons / 28), ils sont au moins qualifiés de sol à teneur moyenne en matière organique, sinon moyennement élevée.

Le sol ME7 comporte le niveau le plus riche en matière organique avec les 5,45% du niveau (20-40 cm), alors que le taux le plus bas est celui du niveau (20-40 cm) du sol ME4 avec seulement 1,11%.

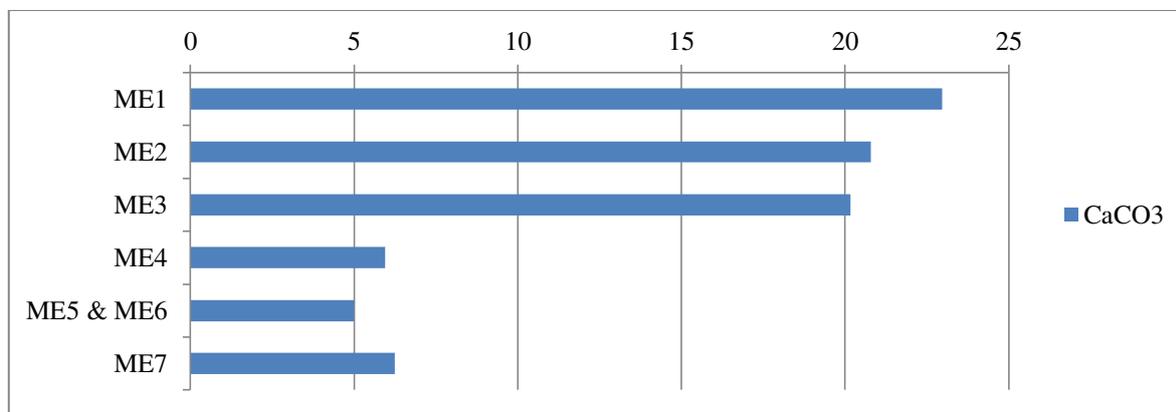


Fig. 48: moyennes des teneurs en calcaire total de chaque sol sous pistachier de l'Atlas échantillonné de la daya d'el-Mergueb.

En moyenne (Tableau 22 et Fig. 49), les sols de cette daya ont une teneur de 3,29%. Le sol ME7 ayant la teneur la plus élevée de l'échantillon avec ses 4,02% et le sol ME1 la teneur la plus faible avec ses 2,51% de moyenne.

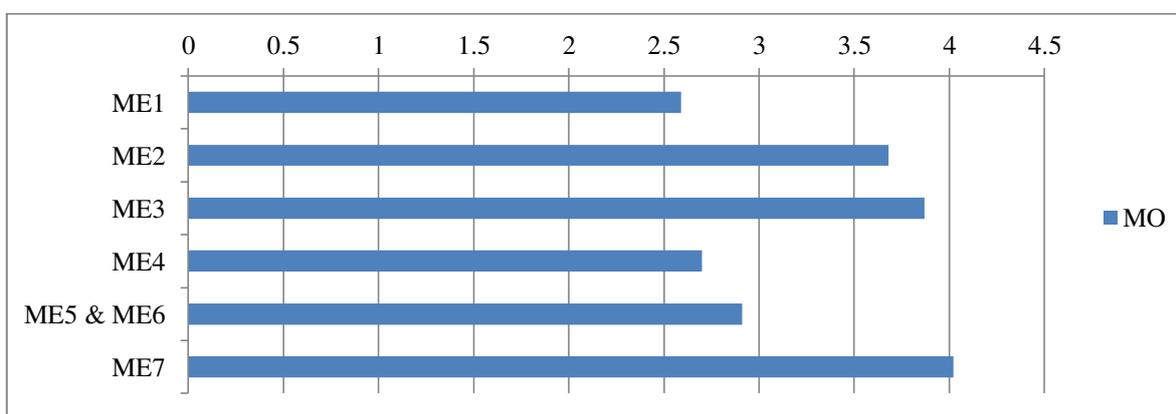


Fig. 49 : moyennes des teneurs en matière organique de chaque sol sous pistachier de l'Atlas échantillonné de la daya d'el-Mergueb.

### 2.3.2. Corrélations statistiques des variables pédologiques

Les résultats des tests de corrélation de Pearson confrontant les variables pédologiques (Tableau 23 et Tableau 24), montrent que la capacité de rétention en eau de ces sols est

positivement corrélée à leurs taux de limons totaux (particulièrement ceux des limons grossiers), comme le sont les taux de calcaire total (mais particulièrement avec les taux de limons fins).

Ces mêmes taux de calcaire total montrent une corrélation négative avec les taux de sables totaux, ceux-ci montrent en même temps une corrélation tout aussi négative avec les taux de limons totaux.

Tableau 23 : corrélations entre les variables pédologiques des sols sous pistachiers de la daya d'el-Mergueb (a).

	A	LF	LG	SF	SG	CR	CaCO <sub>3</sub>	pH	MO
A	1	-	-	-	-	-	-	-	-
LF	-0.45	1	-	-	-	-	-	-	-
LG	<b>-0.82</b>	0.55	1	-	-	-	-	-	-
SF	-0.18	-0.29	-0.02	1	-	-	-	-	-
SG	0.36	-0.52	-0.48	-0.58	1	-	-	-	-
CR	-0.64	0.67	<b>0.76</b>	-0.60	0.01	1	-	-	-
CaCO <sub>3</sub>	-0.17	<b>0.82</b>	0.52	-0.33	-0.53	0.51	1	-	-
pH	-0.05	-0.37	0.32	-0.36	0.42	0.34	-0.22	1	-
MO	0.36	-0.36	0.13	-0.19	0.09	-0.05	0.14	0.69	1
<i>En gras, valeurs significatives (hors diagonale) au seuil alpha=0.05 (test bilatéral)</i>									
A : taux d'argiles (%); LF : limons fins (%); LG : Limons grossiers (%); SF : sables fins; SG : sables grossiers (%); CaCO <sub>3</sub> : taux de calcaire total (%); CR : capacité de rétention en eau (%); MO : taux de matière organique (%).									

Tableau 24 : corrélations entre les variables pédologiques des sols sous pistachiers de la daya d'el-Mergueb (b).

	A	LT	ST	CR	pH	CaCO <sub>3</sub>	MO
A	1	-	-	-	-	-	-
LT	-0.72	1	-	-	-	-	-
ST	0.21	<b>-0.83</b>	1	-	-	-	-
CR	-0.64	<b>0.81</b>	-0.62	1	-	-	-
pH	-0.05	-0.04	0.10	0.34	1	-	-
CaCO <sub>3</sub>	-0.17	<b>0.77</b>	<b>-0.94</b>	0.51	-0.22	1	-
MO	0.36	-0.14	-0.10	-0.05	0.69	0.14	1
<i>En gras, valeurs significatives (hors diagonale) au seuil alpha=0.05 (test bilatéral)</i>							
A : taux d'argiles (%); LT: Limons totaux (%); ST : sables totaux (%); CaCO <sub>3</sub> : taux de calcaire total (%); CR : capacité de rétention en eau (%); MO : taux de matière organique (%).							

En considérant l'évolution selon le sens de la profondeur (niveaux) des variables pédologiques des sols sous pistachier de l'Atlas de la daya d'el-Mergueb, nous avons obtenu la figure 50. Considérant les coefficients de corrélations respectifs, nous constatons que les

taux d'argiles, de sables grossiers et les pH des niveaux de sols tendent à augmenter en profondeur en même temps que tendent à diminuer les taux de limons grossiers, de calcaire total, de matière organique et de la capacité de rétention en eau de ces sols. Le taux de sables grossiers montre une tendance modérée à augmenter en profondeur, tandis que les tendances évolutives des taux de limons fins et de sables fins ne sont pas probantes.

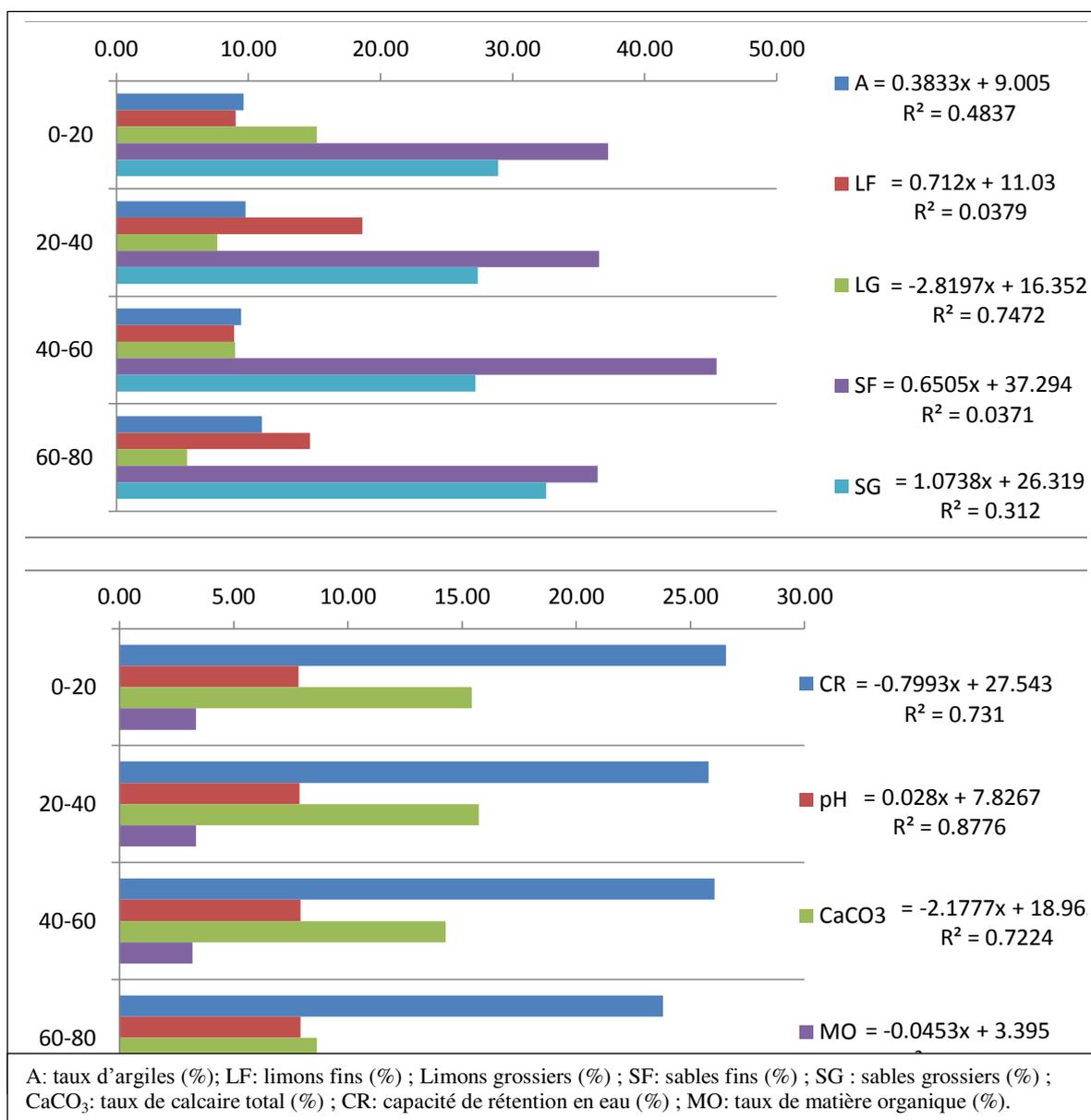


Fig. 50 : évolution selon la profondeur, des variables pédologiques des sols sous pistachier de l'Atlas de la daya d'el Mergueb.

### 2.3.3. Discussion

D'après Kaabache (2003), les sols des « nebkhas » sont considérés riches en sables et même souvent riches en argiles. Selon Pouget (1980a), le matériau des nebkhas est un sable

fin. Nos résultats confirment au moins leurs richesses en sables. En effet, tous les sols des « nebkhas » échantillonnés ont présenté en moyenne plus de 60% de teneur en sables. Le seul sol sous pistachier de l'Atlas qui en a présenté le moins (56,81%) est celui du sujet ME2 qui végète en dehors de ces structures. Par conséquent, ce sol est en moyenne le plus riche en particules granulométriques fines. En effet, le cumul de ses taux moyens en argiles et en limons totaux est de 43,19%, sachant que la moyenne de tous les sols échantillonnés est de 31,14%. Ceci explique sa capacité de rétention en eau la plus élevée parmi l'échantillon considéré (28,42%).

Selon Pouget (1980a), la quasi-totalité des matériaux sur lesquels se sont formés et évoluent les sols des zones arides, se caractérise par la présence de calcaire, il résulte des pH basiques, parfois proches de la neutralité. Les sols échantillonnés d'el-Mergueb sont en moyenne modérément calcaires, leurs pH s'en trouveraient ainsi affectés en étant dans la majorité des cas basiques.

Concernant la matière organique, nous avons constaté que tous les niveaux des sols échantillonnés en sont pourvus, ce qui montre le caractère isohumique des sols sous pistachier de l'Atlas de la daya d'el Mergueb. En effet, selon Pouget (1980a), sous végétation de steppe, la matière organique provient de la décomposition sur place du système racinaire, d'où son incorporation profonde dans le profil (isohumisme). D'après Rognon (1994), en régions sèches, l'évolution de la matière organique peut aboutir entre autre, à un stockage prolongé dans l'humus du sol.

Les tests de corrélations statistiques ont montré la forte corrélation entre les taux de limons totaux, les taux de calcaire total d'une part et d'autre part entre ces derniers et la capacité de rétention en eau de ces sols. La forte corrélation entre les taux de calcaire total et les taux de limons totaux s'expliquerait par le fait que la fraction limoneuse serait de nature calcaireuse. La forte affinité entre ces variables et la capacité de rétention en eau des sols échantillonnés, rappelle le comportement d'un type de sol appelé « sols lœssiques ». La définition des sols lœssiques est double : lithologique (limon calcaire) et génétique (dépôt éolien). Ce sont des sols formés sur des « lœss » qui sont des roches sédimentaires détritiques, meubles, formées par l'accumulation de limons issus de l'érosion éolienne (déflation), dans les régions désertiques et périglaciaires. Le lœss est formé principalement de silice (quartz détritique) et de carbonate de calcium (Calcite,  $\text{CaCO}_3$ ). Il se caractérise par un très bon tri granulométrique dû à son origine éolienne, avec essentiellement des grains compris entre 10 et 50 micromètres (limons). Les terres lœssiques sont réputées favorables à l'agriculture, en

particulier grâce à leur capacité de rétention en eau (Guobin, 1999). Des travaux récents ont montré leur présence dans les régions arides d'Algérie (Nouaouria et *al.*, 2008).

En effet, il se trouve que notre zone d'étude renferme tous ces "ingrédients" : du sable riche en quartz donc en silice, d'origine autochtone ou allochtone, déposés par les vents depuis les zones sources sahariennes très proches de notre zone d'étude et un substratum essentiellement calcaire hérité du quaternaire (Pouget, 1980b).

Nous assistons donc dans cette station à une forme de « vicariance » joué par les limons calcaires dans la rétention d'eau, qui habituellement est le rôle des argiles et autres matières organiques. En effet, ces dernières composantes sont dans ces sols en majorité faiblement présentes pour les argiles et moyennement présentes quant à la matière organique.

## **2.4. Caractéristiques racinaires**

### **2.4.1. Résultats**

Les résultats bruts des différentes mesures racinaires des individus échantillonnés sont portés par le tableau 25. Quant à la figure 51, elle montre les différents profils racinaires réalisés lors de cet échantillonnage.

Les résultats montrent que tous les sujets échantillonnés ont émis des racines superficielles. Les sujets ME1 et ME3 en possède le plus (10 et 9 respectivement), alors qu'ils n'ont pas émis de racines profondes contrairement au restant de l'échantillon.

Le même sujet ME1 a développé le plus de longueur des racines superficielles avec ses 470 cm et le plus de ramifications de ses mêmes racines (50 ramifications). Cependant, les racines superficielles du sujet ME4 sont les plus épaisses (19 cm).

Des 5 sur les 7 sujets qui ont émis des racines profondes, le sujet ME7 a totalisé les plus longues avec ses 113,5 cm, alors que le sujet ME2 a émis les plus épaisses (23,5 cm en moyenne) et enfin, le sujet ME6 en a émis celles qui ont le plus de ramifications (20).

Pour une meilleure lisibilité de nos résultats, nous avons choisi de les pondérer en procédant à leur transformation en pourcentage, ce qui a donné les résultats de tableau 26.

Considérant ces résultats, nous constatons que sur un total de 59 racines échantillonnées, 72,88% sont des racines superficielles, et presque le tiers (27,12%) sont des racines profondes.

Les racines superficielles constituent 68,09% du total des longueurs racinaires et 76,33% du total des ramifications comptabilisées. Cependant, les racines profondes sont les plus épaisses en totalisant les 59,69% du total des circonférences moyennes racinaires.



Fig. 51 : profils racinaires des sujets échantillonnés dans la daya d'el-Mergueb (Mars 2008)

(Photos : Limane.).

Tableau 25: résultats des mesures racinaires des individus échantillonnés à el Mergueb

Sujets	RS	LTRS (cm)	CMRS (cm)	RRS	RP	LTRP (cm)	CMRP (cm)	RRP
ME1 ♂ (j)	<b>10</b>	<b>470</b>	4.7	<b>50</b>	0	0	0	0
ME2 ♀ (r.a)	4	199.5	8.8	10	4	210	<b>23.5</b>	2
ME3 ♀ (a)	9	289	5.94	27	0	0	0	0
ME4 ♀ (j)	5	155	<b>19</b>	23	4	102.25	12.25	2
ME5 ♂ (t.j)	5	110	7	7	3	130	12.75	10
ME6 i (t.j)	5	190	1.5	13	1	80	10	<b>20</b>
ME7 ♂ (j)	5	133	10.5	12	4	<b>113.5</b>	10.5	6

RS : nombre de racines superficielles ; RP : nombre de racines profondes ; LTR : longueur totale des racines (S : superficielles ; P : profondes) ; CMR : circonférences moyennes des racines (S : superficielles ; P : profondes) ; RR : nombre des ramifications des racines (S : superficielles ; P : profondes) ; i : immature ; t.j : très jeune ; j : jeune ; r.a : relativement âgé ; a : âgé.

Tableau 26 : résultats (en %) des mesures racinaires des individus échantillonnés à el-Mergueb.

Racines superficielles	RS	LTRS (cm)	CMRS (cm)	RRS
Mesures brutes	43	1356.5	9.32	129
%	72.88	68.09	40.31	76.33
Racines profondes	RP	LTRP (cm)	CMRP (cm)	RRP
Mesures brutes	16	635.75	13.8	40
%	27.12	31.91	59.69	23.67
Totaux	NTR	LTR	CMR	RTR
Mesures brutes	59	1992.25	23.12	169
%	100	100	100	100

RS : nombre de racines superficielles ; RP : nombre de racines profondes ; LTR : longueur totale des racines (S : superficielles ; P : profondes) ; CMR : circonférences moyennes des racines (S : superficielles ; P : profondes) ; RR : nombre des ramifications des racines (S : superficielles ; P : profondes).

#### 2.4.2. Corrélations statistiques des variables racinaires

Les résultats de la confrontation des variables racinaires des pistachiers de l'Atlas échantillonnés dans la daya d'el-Mergueb sont illustrés par le tableau 27.

Concernant les racines superficielles, nous constatons que leur nombre est positivement corrélé à leur longueur totale et au nombre de leurs ramifications. Par contre, il est négativement corrélé au nombre, aux longueurs totales et aux circonférences moyennes des racines profondes.

Tableau 27 : corrélations entre les variables racinaires des pistachiers de l'Atlas de la daya d'el-Mergueb.

	RS	LTRS	CMRS	RRS	RP	LTRP	CMRP	RRP
RS	1	-	-	-	-	-	-	-
LTRS	<b>0.88</b>	1	-	-	-	-	-	-
CMRS	-0.35	-0.39	1	-	-	-	-	-
RRS	<b>0.89</b>	<b>0.93</b>	-0.10	1	-	-	-	-
RP	<b>-0.84</b>	<b>-0.76</b>	0.70	-0.65	1	-	-	-
LTRP	<b>-0.90</b>	-0.69	0.32	<b>-0.77</b>	<b>0.86</b>	1	-	-
CMRP	<b>-0.90</b>	-0.65	0.32	-0.74	<b>0.82</b>	<b>0.99</b>	1	-
RRP	-0.47	-0.45	-0.45	-0.53	-0.02	0.18	0.19	1
<i>En gras, valeurs significatives (hors diagonale) au seuil alpha=0.05 (test bilatéral)</i>								
RS : nombre de racines superficielles ; LTRS : longueur totale des racines superficielles ; CMRS : circonférence moyenne des racines superficielles ; RRS : nombre de ramification des racines superficielles ; RP : nombre de racines profondes ; LTRP : longueur totale des racines profondes ; CMRP : circonférence moyenne des racines profondes ; RRP : nombre de ramification des racines profondes.								

Les longueurs totales des racines superficielles sont positivement corrélées au nombre de leurs ramifications, mais inversement corrélées au nombre de racines profondes. Quant au nombre de ramifications des racines superficielles, il est négativement corrélé aux longueurs totale des racines profondes.

Le nombre de racines profondes montre une corrélation positive avec les longueurs et les circonférences moyennes de ces dernières. Les longueurs totales de ce type de racines sont corrélées positivement avec leurs circonférences moyennes.

Nous constatons que l'émission de racines profondes n'est apparemment lié ni à l'âge ni au sexe. En effet, parmi les individus qui n'ont en pas émis, on trouve aussi bien un jeune mâle (ME1) qu'une femelle âgée (ME3). Même le sujet immature ME6 n'a en fait émis qu'une seule racine profonde qui n'est en réalité que son pivot séminal.

Les interactions statistiques montrent que les systèmes racinaires étudiés présentent une certaine coordination lors leur développement. En effet, quand les racines superficielles augmentent en nombre, elles s'allongent et se ramifient en conséquence, mais en même temps, le nombre de racines profondes diminue (et/ou vice-versa).

Par ailleurs, quand il y a émission de racines profondes, elles s'allongent et s'épaississent.

Mais dans l'ensemble, les systèmes racinaires échantillonnés dans la daya d'el-Mergueb sont dans leur majorité de type généralisé (colonisant donc les niveaux superficiels et

profonds), ce qui dénote de l'intérêt de ces deux niveaux dans la survie des individus dans ce type de biotope.

## 2.5. Interactions sol / système racinaire

### 2.5.1. Résultats

Les résultats du test de corrélation de Pearson appliqué à ces variables sont présentés dans le tableau 28.

Tableau 28 : corrélations entre les variables pédologiques et celles racinaires de la population d'el- Mergueb.

	RS	LTRS	CMRS	RRS	RP	LTRP	CMRP	RRP
A	0.19	-0.16	-0.54	-0.26	-0.46	-0.37	-0.40	0.38
LF	0.45	0.74	-0.22	0.59	-0.37	-0.11	-0.05	-0.45
LG	-0.14	0.20	0.41	0.16	0.43	0.45	0.48	-0.60
LT	0.18	0.55	0.10	0.43	0.02	0.18	0.24	-0.60
SF	-0.08	-0.24	<b>0.80</b>	0.08	0.26	-0.12	-0.08	-0.26
SG	-0.29	-0.34	-0.49	-0.43	0.06	0.15	0.06	0.71
ST	-0.41	-0.64	0.29	-0.40	0.34	0.04	-0.01	0.53
CR	-0.09	0.33	-0.17	0.12	0.17	0.43	0.44	-0.20
pH	-0.72	-0.61	0.07	<b>-0.76</b>	0.68	<b>0.78</b>	0.73	0.20
CaCO <sub>3</sub>	0.64	<b>0.79</b>	-0.26	0.61	-0.47	-0.29	-0.26	-0.68
MO	-0.17	-0.30	0.00	-0.42	0.23	0.23	0.17	-0.19

*En gras, valeurs significatives au seuil alpha=0.05 (test bilatéral)*

RS : nombre de racines superficielles ; LTRS : longueur totale des racines superficielles ; CMRS : circonférence moyenne des racines superficielles ; RRS : nombre de ramification des racines superficielles ; RP : nombre de racines profondes ; LTRP : longueur totale des racines profondes ; CMRP : circonférence moyenne des racines profondes ; RRP : nombre de ramification des racines profondes ; A : taux d'argiles (%); LF : limons fins (%); LG : limons grossiers (%); LT: limons totaux (%); SF : sables fins (%); SG : sables grossiers (%); ST : sables totaux (%); CaCO<sub>3</sub> : taux de calcaire total (%); CR : capacité de rétention en eau (%); MO : taux de matière organique (%).

Les résultats du test de corrélation montrent que les longueurs totales des racines superficielles sont positivement corrélées aux taux de calcaire total de ces sols, alors que les longueurs des racines profondes sont positivement corrélées aux pH de ces sols, contrairement aux nombre de ramifications des racines superficielles qui sont négativement corrélées à ces pH. Les circonférences moyennes des racines superficielles sont positivement corrélées à la teneur des sols en sables fins.

Pour une meilleure visibilité des interactions entre les variables considérées, nous avons réalisé une ACP (Fig. 52), qui montre les contributions de celles-ci selon les deux axes principaux de l'hyperespace statistique.

Les deux axes F1 et F2 expliquent 69% de l'inertie constatée. Nous distinguons deux ensembles (A et B). L'ensemble A montre la haute affinité des variables limons /calcaire total entre elles d'une part et avec la capacité de rétention en eau de ces sols d'autre part.

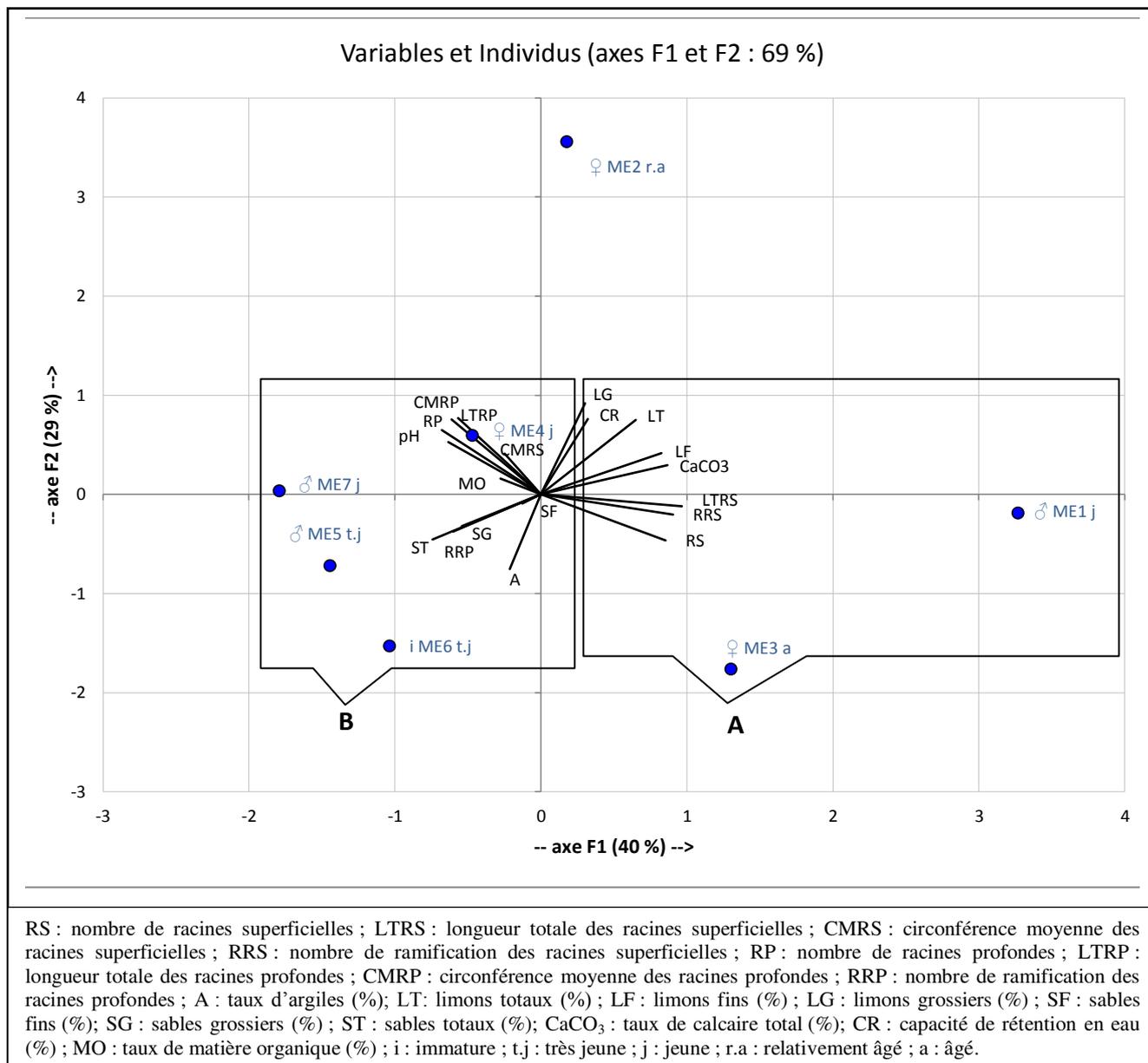


Fig. 52 : ACP appliquée aux variables racinaires et celles pédologiques de la daya d'el-Mergueb.

Le nombre de racines superficielles et leurs caractéristiques (sauf leurs circonférences moyennes) suivent ces variables pédologiques. Nous constatons que les individus ayant adhéré à ce groupe de variables sont ceux qui n'ont pas développés de racines profondes, mais le plus de racines superficielles, il s'agit du jeune mâle ME1 et de la femelle âgée ME3.

Quant à l'ensemble B, il rassemble tous les individus qui en plus de racines superficielles ont développés des racines profondes. Ce groupe suit le pH, les taux de matière organique, de sables et d'argiles de ces sols. Dans cet ensemble, nous recensons deux très jeunes individus (le mâle ME5 et l'immature ME6), deux jeunes individus (la femelle ME4 et le mâle ME7), mais pas d'individus âgés.

Le sujet ME2 se singularise à l'écart des deux ensembles (A et B). Il s'agit d'un sujet femelle relativement âgé qui a pourtant développé en même temps des racines superficielles et des racines profondes comme les individus de l'ensemble B. Mais en moyenne, il a les sols les plus pourvus en limons totaux. La capacité de rétention en eau moyenne de ses sols est la plus élevée de l'échantillon. Cette singularité sera liée au fait que c'est le seul sujet échantillonné en dehors des nebkhas. Ceci confirme qu'il s'agirait de deux types de sols.

### **2.5.2. Discussion**

Les conditions climatiques de cette station ont montré que celle-ci ne bénéficie que de 215.03 mm/an de pluies et traverse 10 mois de sécheresse par année. Ces conditions qui ont permis de la classer dans l'étage bioclimatique « aride tempéré », mettent en porte à faux l'éventuelle suffisance de ce régime de pluies pour pourvoir aux besoins de ces phanérophytes. Mais si on prend en considération la topographie de la daya, l'avantage de ces biotopes apparaît.

En effet, Floret et Pontanier (1982) ont décrit les sols qui présenteraient le meilleur comportement hydrique vis-à-vis d'un régime pluviométrique déjà peu favorable en étant ceux qui :

- se trouvent en position de bas versant ou de bas fond (apport par ruissellement) ;
- offrent une infiltration rapide ;
- peuvent stocker l'eau à moyenne profondeur grâce à un horizon réservoir limité par un obstacle à l'infiltration (croûte gypseuse) ;
- offrent un self-mulching contre l'évaporation.

Par ailleurs, Cortina *et al.* (2012) ont montré que ces biotopes reçoivent par le biais du ruissellement, des quantités d'eau plus importantes que celles attendues sous de tels régimes de précipitations. Les eaux ainsi collectées directement et par ruissellement percolent à travers les couches superficielles vers les couches profondes plus rétentrices en eau, et qui constituent un réservoir pourvoyeur en eau et à l'abri de l'évaporation.

Ainsi, la forme en dépression de la daya permet de collecter par effet « entonnoir » plus d'eau que les milieux environnants. La capacité de rétention en eau des sols sous pistachiers de l'Atlas dans cette daya incombe principalement aux limons calcaires de ces sols. En effet, ces derniers montrent une forme de « vicariance » dans ce rôle de rétention qui habituellement, incombe aux argiles et autres matières organiques.

Les systèmes racinaires des individus dans ces conditions s'adaptent et suivent cette composante limono-calcaire étant donné qu'elle devient la pourvoyeuse principale en eau dans ces sols. Les systèmes racinaires y paraissent majoritairement généralisés. En effet, une grande partie de leur biomasse estimée en moyenne à plus de 70% est allouée à l'élaboration d'un réseau superficiel long et ramifiés qui assure les avantages décrits précédemment et argumentés par Lynch (1995), Adiku et *al.*, (2000), Raimbault (2003) et par Schenk et Jackson (2002b) (*cf.* p 92), mais allouent aussi une autre partie, donc les presque 30% restants, dans l'élaboration de racines profondes longues et épaisses qui leurs permettent vraisemblablement de traverser la longue saison sèche de cette région, estimée à 10 mois par an.

Le nombre de racines profondes constitue certes une petite portion de l'ensemble des racines de ces plantes, cependant elles jouent un rôle crucial dans le pourvoi de la plante en eau pendant les saisons sèches (Gregory et *al.*, 1978 ; Stone and Kalisz, 1991). Chez certains arbustes et arbres de l'Australie Occidentale qui présente un climat de type méditerranéen, la conductivité hydraulique des racines profondes est substantiellement plus grande que celle des racines superficielles, principalement due à leurs très larges vaisseaux de xylèmes (1.5-2 mm pour les premiers) (Pate et *al.*, 1995). Ce type de racines (profondes) montre toujours des densités élevées de vaisseaux par unité de surface, indiquant que leur rôle majeur est le transport de l'eau.

Seul deux individus de l'ensemble de l'échantillon n'ont pas émis de racines profondes, en l'occurrence ME1 et ME3, ils se sont suffits d'un système racinaire exclusivement superficiel. Cependant, ils l'y ont investi d'une façon optimale, de telle sorte qu'ils présentent les racines superficielles les plus longues et les plus ramifiées de tous l'échantillon.

La richesse en argiles des niveaux superficiels du sol de ME3 et la richesse en limons et calcaire des niveaux superficiels du sol de ME1 paraissent être garants d'un pourvoi suffisant en eau, même pendant la saison sèche qu'ils doivent traverser dans cette daya d'el-Mergueb et qui dure 10 mois de l'année. Ces conditions édaphiques les dispensent apparemment d'un tel investissement couteux en biomasse.

L'âge et le sexe ne semblent pas être déterminants dans l'orientation de l'architecture racinaire des individus échantillonnés. Cette étude montre la prépondérance des variables pédologiques dans ce façonnement, du moins pour cet échantillon.

### 3. Daya de Lekhneg (Laghout)

#### 3.1. Caractéristiques des individus échantillonnés

Les principales caractéristiques des pistachiers de l'Atlas échantillonnés dans la daya de Lekhneg sont illustrées par le tableau 28b.

Tableau 28b: principales caractéristiques des individus échantillonnés dans la daya de Lekhneg.

Stations et coordonnées	Code des Individus	Sexe	Hauteur (m)	Circonférence du tronc (cm)	Diamètre de couronne (m)
Daya de Lekhneg 33° 41 ,400 N 2° 39.761 E Alt.836.98 m	LE1	F	8.5	197	14
	LE2	M	8	188	9
	LE3	i	2	17.5	1.5
	LE4	i	1.8	24	1.5
	LE5	M	6	83	4.9
	LE6	F	7.5	140	9.9

LEn : individu n ; F : Femelle ; M : Mâle ; i : immature.

L'échantillon est formé d'autant de mâles que de femelles et d'individus immatures.

#### 3.2. Estimation des classes d'âges relatifs des individus échantillonnés

Par le biais de la méthode de Liorzou (1956), nous avons obtenu les résultats suivants pour cette population (Tableau 29).

Tableau 29 : classes des circonférences des troncs et âges relatifs des individus échantillonnés dans la daya de Lekhneg.

$X_{i \min}$		17.5	Classes		n	Code individu	Classe d'âge/ (symbole)
$X_{i \max}$		197	1	[0 – 60 [	2	LE3, LE4	Très jeune/ (t.j)
Etendue de la classe	<b>d</b>	179.5	2	[60 – 120 [	1	LE5	Jeune/ (j)
Nombre de classes	<b>k</b>	4	3	[120– 180[	1	LE6	Relativement âgé/ (r.a)
Amplitude d'une classe	<b>a</b>	60	4	[180-240[	2	LE1, LE2	Âgé/ (a)
Borne inférieure de la 1 <sup>ère</sup> classe	<b>Li</b>	0	Total		6	6	4
Borne supérieure de la 1 <sup>ère</sup> classe	<b>Ls</b>	60					

Les résultats obtenus montrent que l'échantillon de la population de Lekhneg est constitué de 4 classes de circonférence de tronc. Nous considérons par analogie que la première classe est celle des très jeunes individus, elle renferme les sujets LE3 et LE4. La 2<sup>ème</sup> classe est celle des individus jeunes, elle renferme le seul sujet LE5. La 3<sup>ème</sup> classe comporte les individus relativement âgés représentés par le seul sujet LE6, et enfin, la 4<sup>ème</sup> classe, renfermant les deux sujets LE1 et LE2 considérés âgés.

### **3.3. Caractéristiques pédologiques des sols sous pistachiers de l'Atlas échantillonnés**

#### **3.3.1. Résultats**

Les résultats des analyses physiques et chimiques des sols sous pistachier de l'Atlas de cette station sont présentés dans deux tableaux. Le premier (Tableau 30) contient les résultats détaillés obtenus pour les quatre niveaux de chaque profil pédologique. Le tableau 31 contient les moyennes des niveaux de sol sous chaque pistachier de l'Atlas échantillonné.

Cependant, il faut signaler d'emblée que tous les sols sous pistachiers de l'Atlas échantillonnés appartiennent à des « nebkhas ».

##### **3.3.1.1. Texture**

La fraction argileuse de ces sols est pour le moins appréciable. Elle est en moyenne estimée à 17,25%. Le minimum (3,08%) est enregistré dans le niveau (20-40 cm) du sol du sujet LE3, alors que le taux le plus élevé est celui du niveau (40-60 cm) du sol du sujet LE5 avec 34,01%.

La fraction limoneuse (fine et grossière) constitue 15,57%, elle est en moyenne proche, mais néanmoins inférieure à celle des taux d'argiles de ces sols qui est de 17,25%. Le niveau (20-40 cm) du sol du sujet LE4 a présenté les teneurs les plus faibles en limons fins (1,41%) et en limons grossiers (0,95%). Le niveau (60-80 cm) du sol de LE5 a montré le taux le plus élevé en limons fins avec ses 13,52%, tandis que le niveau (40-60 cm) de LE6 contient les taux les plus élevés en limons grossiers avec 23%.

Quant à la fraction sableuse, ces sols ont montrés en moyenne 54,77% de sables fins et 12,40% de sables grossiers. Dans le détail, le niveau (20-40 cm) du sol du sujet LE3 a montré la plus forte teneur en sables fins avec 77,79% et le niveau (40-60 cm) du sol des sujets LE1 et LE2 en a montré la plus faible avec 34,58%. Le niveau (40-60 cm) du sol du sujet LE4 est le plus riche en sables grossiers avec 30,56%, alors que le niveau (40-60 cm) du sol du sujet LE5 a montré le plus faible taux avec 4,52%.

Tableau 30 : caractéristiques physiques et chimiques des sols sous pistachiers de l'Atlas de la population de Lekhneg.<sup>3</sup>

Sol	Niveaux (cm)	A	LF	LG	SF	SG	Texture	CR	pH	CaCO <sub>3</sub>	MO
LE1 &	0-20	24.25	3.57	2.93	57.38	11.86	LAS	31.49	8.21	<b>16.54</b>	2.06
	20-40	-	-	-	-	-	-	27.02	8.37	9.8	2.75
LE2	40-60	20.25	13.01	12.02	<b>34.58</b>	20.13	LS	28.90	8.48	10.41	2.59
	60-80	9.80	13.20	5.93	50.60	20.49	LS	28.73	8.37	10.41	2.80
LE3	0-20	13.88	5.25	3.51	66.34	11.03	SL	24.94	7.95	9.8	2.59
	20-40	<b>3.08</b>	6.61	4.12	<b>77.79</b>	8.40	S	26.14	7.47	10.41	<b>4.87</b>
	40-60	13.30	3.81	19.41	49.43	14.05	LS	28.77	7.63	11.64	4.55
	60-80	11.42	2.22	5.24	67.13	13.99	LS	26.16	7.86	9.8	4.44
LE4	0-20	-	-	-	-	-	-	<b>21.52</b>	8.10	<b>3.68</b>	4.44
	20-40	8.78	<b>1.41</b>	<b>0.95</b>	74.03	14.83	SL	23.10	<b>7.35</b>	6.74	3.60
	40-60	10.16	3.62	3.71	51.95	<b>30.56</b>	SL	23.71	7.59	4.29	<b>1.16</b>
	60-80	-	-	-	-	-	-	23.87	7.58	6.13	3.38
LE5	0-20	13.57	6.63	3.95	65.60	10.25	LAS	27.65	8.43	9.8	3.70
	20-40	24.95	9.35	3.35	55.29	7.06	LAS	31.49	8.27	9.8	4.34
	40-60	<b>34.01</b>	11.16	8.25	42.06	<b>4.52</b>	LAS	<b>33.49</b>	8.18	9.8	2.43
	60-80	15.21	<b>13.52</b>	22.85	40.37	8.06	LF	31.43	<b>8.59</b>	10.41	2.75
LE6	0-20	-	-	-	-	-	-	25.12	8.06	9.8	2.75
	20-40	27.26	12.28	4.24	51.43	4.80	LAS	29.77	7.53	9.19	1.69
	40-60	23.87	9.74	<b>23.00</b>	36.91	6.49	L	33.30	7.67	7.96	3.07
	60-80	22.28	5.24	5.14	55.40	11.94	LAS	28.29	7.63	6.74	2.43
<i>Moyennes</i>		17.25	7,54	8.03	54.77	12.40	/	27.74	7,97	9,16	3.11
<i>Ecart type</i>		8.26	4.20	7.27	12.84	6.79	/	3.44	0.39	2.77	1.02
<i>Erreur standard</i>		2.07	1.05	1.82	3.21	1.70	/	0.77	0.09	0.62	0.23

A : taux d'argiles (%); LF : limons fins (%); LG : limons grossiers (%); SF : sables fins (%); SG : sables grossiers (%); CaCO<sub>3</sub> : taux de calcaire total (%); CR : capacité de rétention en eau (%); MO : taux de matière organique (%).

Les textures de ces sols sont majoritairement à dominante limoneuse. 6/16 échantillons sont à texture limono-argilo-sableuse et qu'on retrouve surtout dans les niveaux des sols des individus LE5 et LE6. 4/16 sont à texture limono-sableuse et qu'on retrouve dans les niveaux profonds (40-80 cm) des sols des individus LE1, LE2 et LE3.

Par ailleurs une texture sableuse caractérise le niveau (20-40 cm) du sol du sujet LE3, alors que le niveau (40-60 cm) du sol du sujet LE6 est à texture limoneuse. 3/16 des

<sup>3</sup> Les données manquantes concernent uniquement les résultats de la granulométrie de 4 niveaux. Lors de la réalisation de leurs analyses, des erreurs de manipulations ont abouti à des résultats erronés.

échantillons de sol ont montré une texture sablo-limoneuse, ce sont les cas des niveaux (0-20 cm) du sujet LE3 et des niveaux (20-40 cm et 40-60 cm) du sol du sujet LE4.

En moyenne (Tableau 31 et Fig. 53), les sols échantillonnés ont montré un taux de sables élevé avec 68,34%. Le sol du sujet LE4 en est le plus pourvu avec 84,68%, alors que le sol du sujet LE6 a présenté le taux le moins élevé avec 55,65%.

Tableau 31: moyennes des variables pédologiques des sols sous pistachiers de la population de Lekhneg.

Individus	A	LF	LG	LT	SF	SG	ST	Texture	CR	pH	CaCO <sub>3</sub>	MO
LE1 ♀ (a) & LE2 ♂ (a)	18.10	9.93	6.96	16.89	<b>47.52</b>	17.49	65.01	LS	29.04	8.36	<b>11.79</b>	2.55
LE3 i (t.j)	10.42	4.47	8.07	12.54	<b>65.17</b>	11.87	77.04	LS	26.50	7.73	10.41	<b>4.11</b>
LE4 i (t.j)	<b>9.47</b>	<b>2.51</b>	<b>2.33</b>	<b>4.84</b>	62.99	<b>22.69</b>	<b>85.68</b>	SL	<b>23.05</b>	<b>7.66</b>	<b>5.21</b>	3.15
LE5 ♂ (j)	21.94	<b>10.16</b>	9.60	19.76	50.83	<b>7.47</b>	58.30	LAS	<b>31.01</b>	<b>8.37</b>	9.95	3.31
LE6 ♀ (r.a)	<b>24.47</b>	9.08	<b>10.79</b>	<b>19.87</b>	47.91	7.74	<b>55.65</b>	LAS	29.12	7.73	8.42	<b>2.49</b>
<b>Moyennes</b>	<b>16.88</b>	<b>7.23</b>	<b>7,55</b>	<b>14.78</b>	<b>54.88</b>	<b>13.45</b>	<b>68.34</b>	<b>LS</b>	<b>27.74</b>	<b>7.97</b>	<b>9.16</b>	<b>3.12</b>

A : taux d'argiles (%); LF : limons fins (%); LG : limons grossiers (%); LT : limons totaux (%); SF : sables fins (%); SG : sables grossiers (%); ST : sables totaux (%); CaCO<sub>3</sub> : taux de calcaire total (%); CR : capacité de rétention en eau (%); MO: taux de matière organique (%); i : immature.; t. j : très jeune; j : jeune; r.a : relativement âgé; a : âgé.

### 3.3.1.2. Capacité de rétention en eau

Le tableau 30 montre qu'elle est comprise entre une capacité de rétention en eau minimale enregistrée dans le niveau (0-20 cm) du sol du sujet LE4 avec 21,52%, et une maximale enregistrée dans le niveau (40-60 cm) du sol du sujet LE5 et estimée à 33,49%. La majorité des niveaux (16 échantillons /20) ont une capacité de rétention en eau supérieure à 25%.

En moyenne (Tableau 31 et Fig. 53), ces sols échantillonnés ont une capacité de rétention en eau de 27,74%. La plus forte étant enregistrée chez le sol du sujet LE5 avec 31,01%, alors que la plus faible est celle du sol du sujet LE4 avec 23,05%.

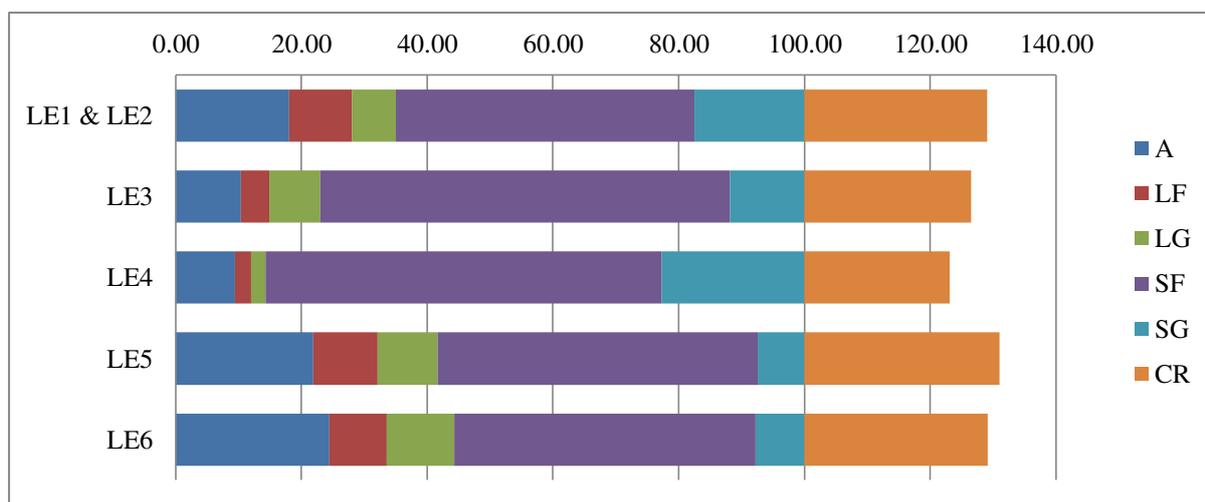


Fig. 53 : moyennes des constituants granulométriques et des capacités de rétention des sols sous pistachier de l'Atlas échantillonné dans la daya de Lekhneg.

### 3.3.1.3. pH

Excepté les sols des niveaux (20-40 cm) du sujet LE4 et celui du niveau (20-40 cm) du sujet LE3 considérés comme neutre selon l'estimatif consulté (Baize, 2000), tous les autres niveaux sont à pH basiques. Le pH le plus élevé est celui du niveau (60-80 cm) du sol de LE5, alors que le plus faible est celui du niveau (20-40 cm) du sujet LE4.

En moyenne (Tableau 31 et Fig. 54), les sols échantillonnés de cette daya ont un pH de 7,97. Le sol du sujet LE5 a le pH le plus élevé de l'échantillon avec ses 8,37, alors que le sol du sujet LE4 a le pH le plus bas de l'échantillon avec ses 7,66.

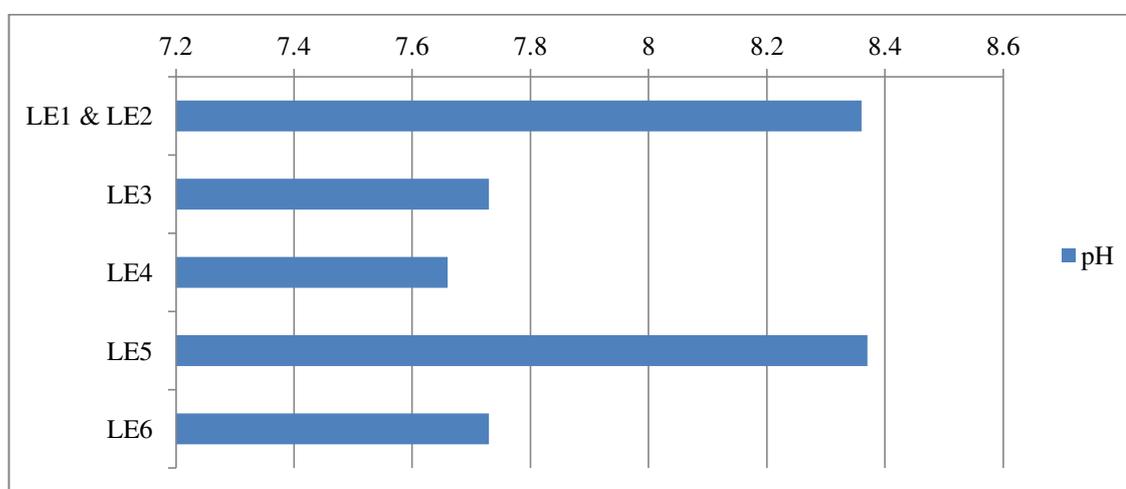


Fig. 54 : moyennes des pH des sols échantillonnés dans la daya de Lekhneg.

### 3.3.1.4. Taux de calcaire total

A part les deux niveaux (0-20 cm) et (40-60 cm) du sol sous pistachier de l'Atlas LE4 considérés comme peu calcaires avec leurs taux respectifs de 3,68% et 4,29%, tous les niveaux restants sont classés modérément calcaires. Le niveau (0-20 cm) du sol des sujets LE1 et LE2 a montré le taux le plus élevé en calcaire total avec 16,54%.

En moyenne (Tableau 31 et Fig. 55), les sols échantillonnés de cette daya ont un taux de calcaire total de 9,16%. Le sol des sujets LE1 et LE2 en est le plus pourvu avec une teneur de 11,79%. Le sol du sujet LE4 a le taux le plus faible avec ses 5,21%.

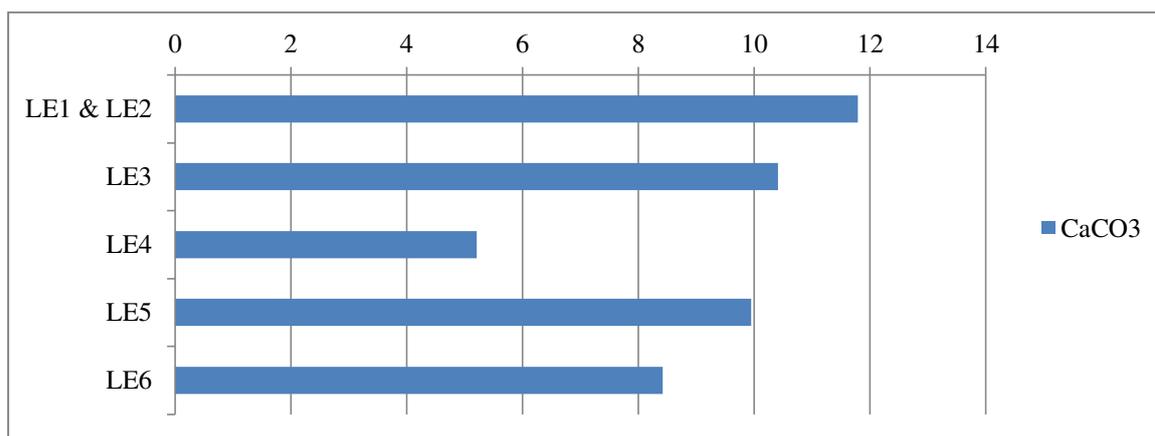


Fig. 55 : moyennes des taux de calcaire total des sols échantillonnés dans la daya de Lekhneg.

### 3.3.1.5. Taux de matière organique

Les extrêmes enregistrés sont le niveau (40-60 cm) du sol du sujet LE4 avec son plus faible taux (1,16%) et considéré ainsi comme très faiblement pourvu en matière organique. Le niveau (20-40 cm) du sol du sujet LE3 est quant à lui à teneur élevée avec 4,87% de matière organique.

Entre les deux, la majorité des niveaux sont considérés ayant des taux moyens à moyennement élevé, sinon faiblement pourvus en matière organique.

En moyenne (Tableau 31 et Fig. 56), la teneur en matière organique de ces sols est de 3,12%. Le sol du sujet LE3 a présenté la plus forte teneur moyenne avec 4,11%, tandis que le sol du sujet LE6 en a présenté la plus faible parmi ces sols avec 2,49%.

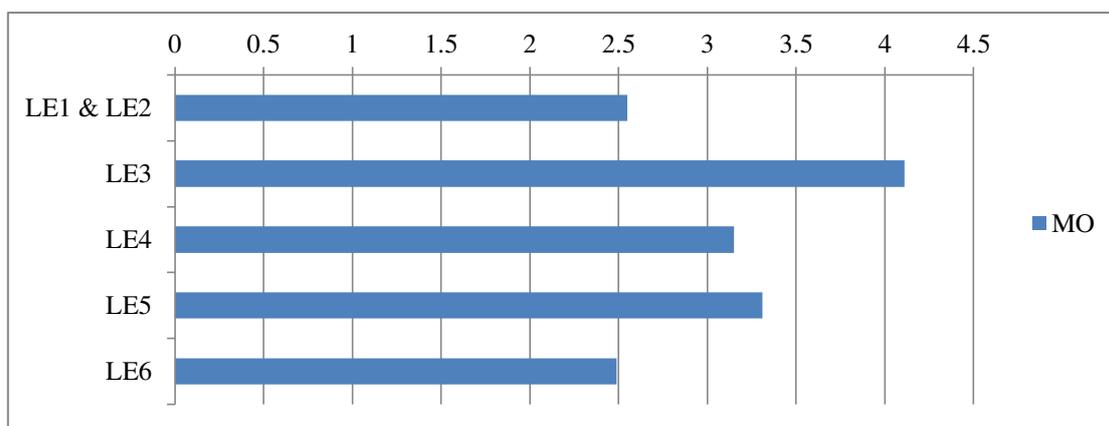


Fig. 56 : moyennes des teneurs en matière organique des sols échantillonnés dans la daya de Lekhneg.

### 3.3.2. Corrélations statistiques des variables pédologiques

Selon le tableau de contingence statistique obtenu (Tableau 32 et Tableau 33), nous constatons que la capacité de rétention en eau de ces sols est très fortement et positivement corrélée à leurs teneurs en argiles et en limons totaux (autant avec le taux des limons fins qu'avec celui des limons grossiers). Elle est par contre négativement corrélée aux taux de sables totaux.

Tableau 32 : corrélations entre les variables pédologiques des sols sous pistachier de l'Atlas de la daya de Lekhneg (a).

	A	LF	LG	SF	SG	CR	pH	CaCO <sub>3</sub>	MO
A	1	-	-	-	-	-	-	-	-
LF	<b>0.87</b>	1	-	-	-	-	-	-	-
LG	0.78	0.66	1	-	-	-	-	-	-
SF	<b>-0.87</b>	<b>-0.94</b>	-0.50	1	-	-	-	-	-
SG	-0.67	-0.47	<b>-0.94</b>	0.27	1	-	-	-	-
CR	<b>0.86</b>	<b>0.95</b>	<b>0.82</b>	-0.79	-0.69	1	-	-	-
pH	0.45	0.80	0.21	-0.69	-0.06	0.72	1	-	-
CaCO <sub>3</sub>	0.34	0.70	0.48	-0.52	-0.26	0.71	0.73	1	-
MO	-0.61	-0.60	-0.07	<b>0.84</b>	-0.16	-0.33	-0.37	-0.13	1

*En gras, valeurs significatives (hors diagonale) au seuil alpha=0.05 (test bilatéral)*

A : taux d'argiles (%); LF : limons fins (%); LG : limons grossiers (%); SF : sables fins (%); SG : sables grossiers (%); CaCO<sub>3</sub> : taux de calcaire total (%); CR : capacité de rétention en eau (%); MO : taux de matière organique (%).

Tableau 33: corrélations entre les variables pédologiques des sols sous pistachier de l'Atlas de la daya de Lekhneg (b).

	A	LT	ST	CR	pH	CaCO <sub>3</sub>	MO
A	1	-	-	-	-	-	-
LT	<b>0.96</b>	1	-	-	-	-	-
ST	<b>-0.99</b>	<b>-0.99</b>	1	-	-	-	-
CR	<b>0.86</b>	<b>0.96</b>	<b>-0.92</b>	1	-	-	-
pH	0.45	0.62	-0.53	0.72	1	-	-
CaCO <sub>3</sub>	0.34	0.59	-0.48	0.71	0.73	1	-
MO	-0.61	-0.54	0.57	-0.33	-0.37	-0.13	1
<i>En gras, valeurs significatives (hors diagonale) au seuil alpha=0.05 (test bilatéral)</i>							
A : taux d'argiles (%); LT : limons totaux (%); ST : sables totaux (%); CaCO <sub>3</sub> : taux de calcaire total (%); CR : capacité de rétention en eau (%); MO : taux de matière organique (%).							

Les taux d'argiles sont positivement corrélés aux taux de limons totaux mais, ils sont inversement corrélés aux taux des sables totaux (particulièrement avec celui des sables fins).

Les taux de limons totaux sont inversement corrélés à celui des sables totaux. Dans le détail, nous constatons que les taux des sables fins et des sables grossiers sont inversement corrélés aux taux des limons fins et des limons grossiers respectivement.

Enfin, les taux de matière organique de ces sols sont inversement corrélés à ceux des sables fins.

En considérant l'évolution des variables pédologiques dans le sens de la profondeur (niveaux de sols), nous avons obtenus la figure 57. Les résultats montrent que selon la profondeur, la capacité de rétention en eau des sols sous pistachier de l'Atlas de la daya de Lekhneg reste globalement conséquente et montre plutôt une tendance à augmenter ( $R^2 = 0,37$ ). Leurs taux d'argiles restent stables, mais leurs taux de limons fins, des limons grossiers et sables grossiers augmentent en profondeur contrairement aux taux des sables fins qui tendent à diminuer. Quant aux taux de calcaire total, nous constatons qu'ils montrent une tendance à diminuer selon la profondeur, alors que les pH de ces niveaux sont constants comme l'est d'ailleurs leur teneur en matière organique.

### 3.3.3. Discussion

Rappelons que tous les sols sous pistachier échantillonnés dans cette daya appartiennent à des structures appelées nebkhas. Selon Pouget (1980a), le matériau des nebkhas est un sable fin. D'après Kaabache (2003), les sols des « nebkhas » sont considérés riches en sables et même souvent riches en argiles. Les résultats des analyses des sols échantillonnés dans la daya de Lekhneg montrent en effet qu'ils sont constitués en moyenne de 54,77% de sables fins, mais aussi d'argiles et en quantité même supérieure à celle des sables grossiers (12,40%)

et des limons totaux (15,57%). Ces argiles se retrouvent dans tous les niveaux échantillonnés avec une moyenne de 17,25%.

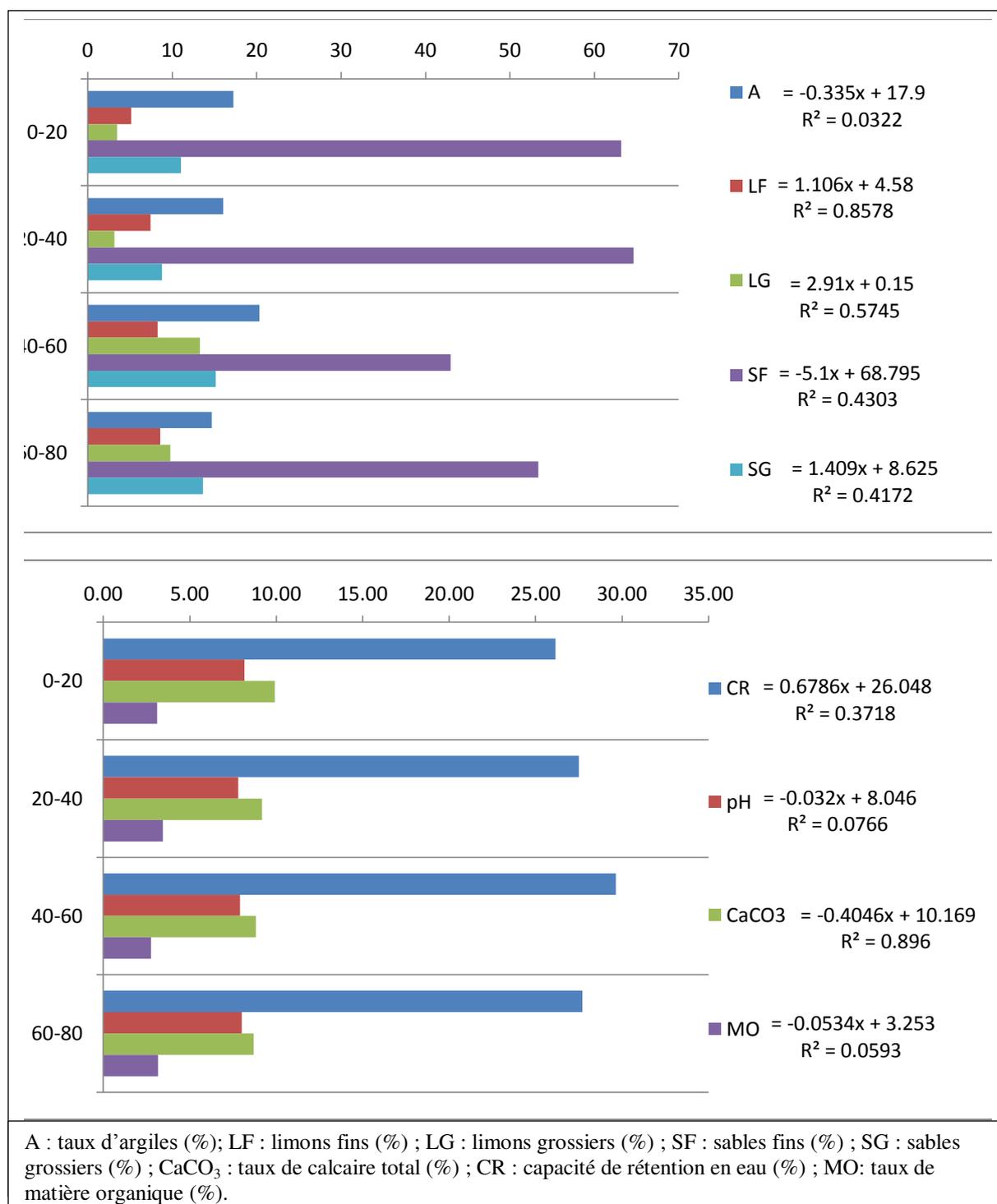


Fig. 57 : évolution selon la profondeur des variables pédologiques des sols sous pistachiers de l'Atlas de la daya de Lekhneg.

Les travaux sur les sols sous pistachier de l'Atlas de la même région (Laghouat) ont montré que dans la daya Timzerth la texture de ces sols était limoneuse (Deguiche, 2008). Ceux de Amroune (2013) sur la daya de Aiat Timzerth ont révélé des textures sablo-limoneuse, limono-sableuse à limono-argilo-sableuse. Boubrima (2014) a confirmé les deux premières textures lors de ses travaux sur la même daya. Par ailleurs, les travaux sur la daya de Hassi Delâa (Boubrima, 2014) ont conclu à des textures limoneuse à limoneuse fine, limono-sableuse et même limono-argileuse. Enfin, les travaux de Hamitouche (2016) sur les sols de la daya d'El Gouffa, ont montrés des textures limoneuses fines à limoneuses fines argileuses.

Bounceur (2009) a trouvé que les sols échantillonnés dans la daya de Tirlhemt avaient une texture limoneuse fine à limono-sableuse.

Les capacités de rétention de tous les niveaux de sol échantillonnés varient entre 21,52% et 33,49%, avec une moyenne de 27,74%. Ces capacités de rétention sont pour le moins importantes et de plus avec un écart-type plutôt faible (3,44), donc des valeurs proches.

Les travaux précédents ayant portés sur des sols sous pistachier de l'Atlas de la même région (Laghouat) ont conclu à des capacités de rétention variant entre 22,3% et 33,19% pour les sols de la daya de Timzerth (Chebieb, 2008), entre 17,27% et 27,75% pour les sols de Tirlhemt (Kebci, 2008), entre 28,66% et 39,07% pour les sols de la daya de Aiat (Timzerth) (Boubrima, 2014), entre 37,84% et 44% pour dayate Saadi (Hassi Delâa) (Boubrima, 2014) et enfin entre 22,12% et 32,77% pour la daya d'El Gouffa (Hamitouche, 2016).

Donc à l'échelle de la région d'étude (toute station confondue de Laghouat), nous constatons que les capacités de rétention des sols sous pistachier de l'Atlas varient entre un minimum de 17,27% et un maximum de 44%.

Selon la profondeur, nous avons constaté que cette même capacité de rétention en eau a plutôt tendance à augmenter, malgré la constance des teneurs en argiles de ces sols. Ceci s'expliquerai par la tendance des teneurs en limons fins et limons grossiers à augmenter dans le sens de la profondeur, et qui remplaceraient les sables fins qui tendent à diminuer suivant le même sens.

Les résultats obtenus en analysant la teneur en calcaire total des sols de la daya de Lekhneg ont montré des teneurs moyennes avoisinant les 10%.

Des travaux précédents sur les sols sous pistachier de l'Atlas de la même région (Laghouat) ont conclu que ces sols avaient des taux de calcaire total variant entre 10,41% et 22,80% dans le cas de daiate Saadi (Hassi Delâa) (Boubrima, 2014), entre 9,58% et 13,75% pour la daya d'Aiat (Timzerth) (Boubrima, 2014), entre 5,62% et 51,87% pour la même daya,

mais selon Deguiche (2008). Quant à Amroune (2013), elle a trouvé des taux compris entre 19,37% et 23,27% dans les sols de dayate Aiat (Tilrhemt). Bounceur (2009) a rapporté des taux variant entre 7,81% et 25,31% dans les sols de la daya de Tilrhemt. A la daya d'El Gouffa, Hamitouche (2016) a relevé des taux de calcaire total variant entre 4,53% et 18,75%.

Donc à l'échelle de la région d'étude (toute station confondue de Laghouat), nous constatons que les teneurs en calcaire total varient entre un minimum de 4,53% (donc de sols peu calcaires) et un maximum de 51,87% (donc des sols très fortement calcaires).

Les sols sous pistachier de l'Atlas échantillonnés dans daya de Lekhneg ont montré des pH variant entre 7,66 et 8,37. Les travaux précédents dans la même région (Laghouat) ont montré que les pH des sols échantillonnés varient entre 8,07 et 8,51 dans les sols de la daya de Timzerth (Deguiche, 2008). Bounceur (2009) a mesuré des pH variant entre 8,26 et 8,44 dans les sols de la daya de Tilrhemt. A Timzerth, Amroune (2013) a mesuré des pH variant entre 7,27 et 8,66. Ces valeurs ont été confirmées par Boubrima (2014) en rapportant des pH variant entre 7,57 et 8,70 dans les sols sous pistachier de la même daya. Les analyses effectuées sur les sols de dayate Saadi (Hassi Délâa), le même auteur (Boubrima, 2014) a enregistré des pH variant entre 7,53 et 8,02. Enfin Hamitouche (2016) ayant travaillé sur les sols de la daya d'El Gouffa, a enregistré des pH entre 8,10 et 8,33.

Donc à l'échelle de la région d'étude (toute station confondue de Laghouat), nous constatons que les pH des sols sous pistachier de l'Atlas varient entre un minimum de 7,27 (donc des sols neutres) et un maximum de 8,70 (donc des sols très basiques). En effet, d'après Pouget (1980b), la quasi-totalité des matériaux sur lesquels se sont formés et évoluent les sols des zones arides, se caractérise par la présence de calcaire, très souvent aussi de gypse et de sels. Il en résulte des pH basiques, parfois proches de la neutralité.

Leur teneur en matière organique varie entre un taux minimal de 1,16% (très faible) et un taux maximal de 4,87% (élevée), mais en moyenne elle est estimée à 3,11%, donc teneur jugée moyenne, ce qui est dans ces milieux arides assez intéressant en soi. L'évolution de la teneur de ces sols en matière organique selon la profondeur a montré une certaine stabilité quantitative qui s'apparente à de l'isohumisme. En effet, les nebkhas constituent selon Pouget (1980a) « un biotope à part ». Elles sont le refuge d'une multitude d'animaux (rongeurs, insectes, serpents, etc.) et d'espèces végétales. Ce qui expliquera la présence de matière organique tout le long des profils (isohumisme). De plus et selon toujours le même auteur, dans ces milieux arides la matière organique provient de la décomposition sur place d'un système racinaire, d'où son incorporation profonde dans le profil (isohumisme).

Les travaux antérieurs sur les sols sous pistachier de l'Atlas de la même région (Laghouat) ont abouti à teneurs comprises entre 0,1% et 2,43% selon Deguiche (2008) dans les sols sous pistachier de l'Atlas de la daya de Timzerth. Bounceur (2009) a trouvé des valeurs comprises entre 0,49% et 1,21% dans les sols de la daya de Tilrhemt, alors qu'Amroune (2013) a trouvé des teneurs comprises entre 3,59% et 10,26%, ce qui est jugé extrêmement élevé surtout dans ces milieux considérés indigents. Boubrima (2014) a rapporté des valeurs comprises entre 1,33%% et 3,41%% pour les sols de dayate Saadi (Hassi Delâa) et entre 0,21% et 1,26% pour les sols sous pistachier de l'Atlas de dayate d'Aiat (Timzerth). Enfin, Hamitouche (2016) ayant travaillé sur les sols de la daya d'El Gouffa, a trouvé des valeurs comprise entre 0,22% et 1,41%.

Donc à l'échelle de la région d'étude (toute station confondue de Laghouat), nous constatons que les teneurs des sols sous pistachier de l'Atlas en matière organique varient entre une teneur minimale de 0,1% (extrêmement faible) et maximale de 10,26% (très élevée).

### 3.4. Caractéristiques racinaires

#### 3.4.1. Résultats

La figure 58 illustre les profils racinaires des individus échantillonnés dans la daya de Lekhneg. Les résultats bruts des différentes mesures racinaires obtenues sont consignés dans le tableau 34.

Tableau 34 : résultats des mesures racinaires des individus échantillonnés à Lekhneg.

Sujets	RS	LTRS (cm)	CMRS (cm)	RRS	RP	LTRP (cm)	CMRP (cm)	RRP
LE1 ♀ (a)	8	540	30.63	41	9	591	14.33	63
LE2 ♂ (a)	8	435	24.81	37	2	129	20.5	4
LE3 i (t.j)	4	179	2.88	15	3	86	3	8
LE4 i (t.j)	0	0	0	0	2	150	12.5	18
LE5 ♂ (j)	6	488	12.92	62	5	238	8.9	14
LE6 ♀ (r.a)	11	541	14.86	64	2	135	9	11

RS : nombre de racines superficielles ; RP : nombre de racines profondes ; LTR : longueur totale des racines (S : superficielles ; P : profondes) ; CMR : circonférences moyennes des racines (S : superficielles ; P : profondes) ; RR : nombre des ramifications des racines (S : superficielles ; P : profondes) ; i : immature ; t.j : très jeune ; j : jeune ; r.a : relativement âgé ; a : âgé.

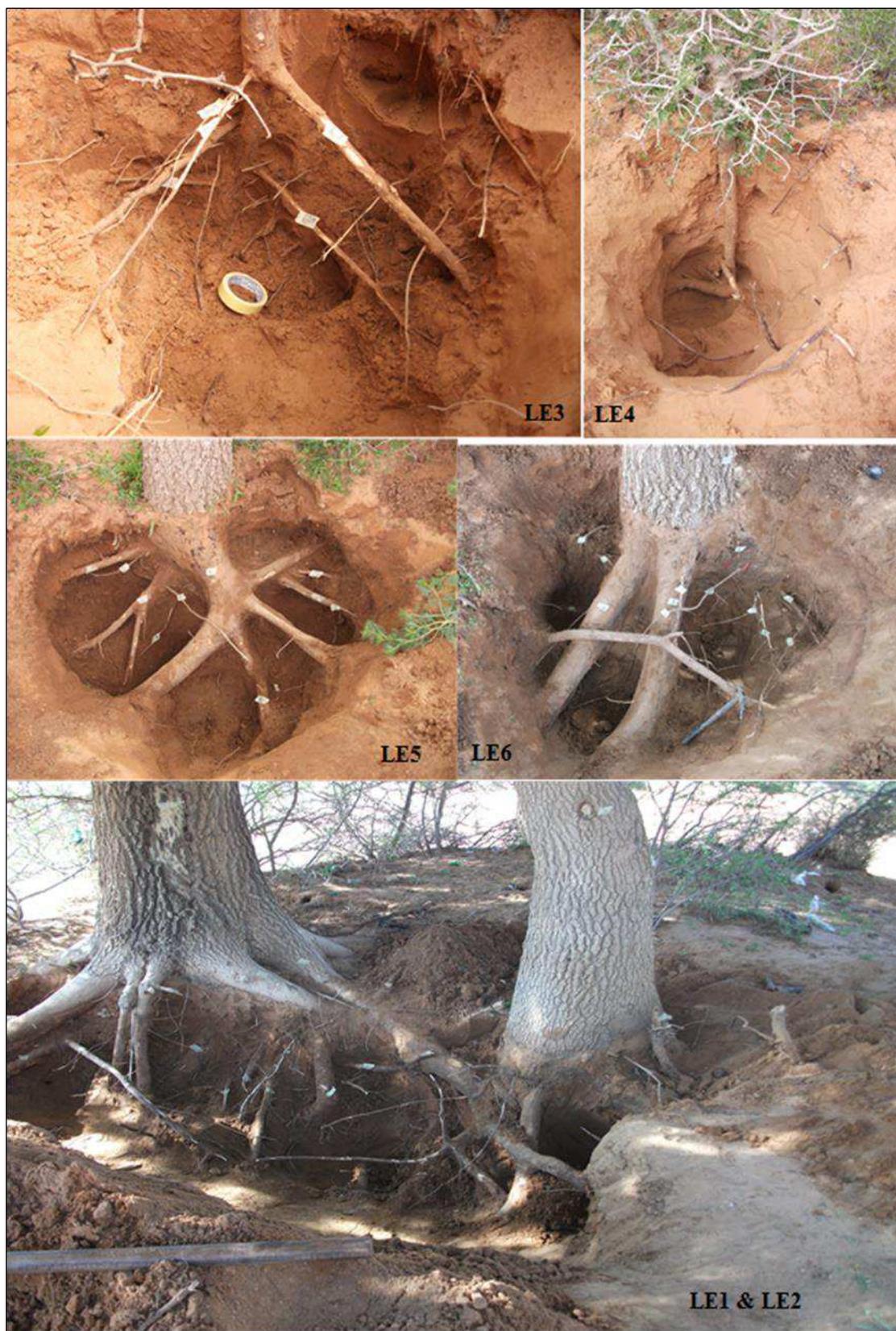


Fig. 58 : profils racinaires des pistachiers de l'Atlas échantillonnés dans la daya de Lekhneg (Avril 2011). (Photos : Limane.).

Ces résultats montrent qu'à part le sujet LE4, tous les autres sujets ont développés les deux types de racines avec des ratios disparates. Le sujet LE1 a développé presque autant de racines superficielles que de racines profondes, il totalise à lui seul les valeurs maximales enregistrées en longueurs, circonférences moyennes et nombre de ramifications racinaires.

Le sujet LE4 se distingue du « lot » par l'absence de racines superficielles. En effet on n'y a enregistré que l'émission de deux racines profondes relativement longues, épaisses et ramifiées.

Pour une meilleure lisibilité de ces résultats, nous avons choisi de les pondérer en procédant à leur transformation en pourcentage, ce qui a donné les résultats du tableau 35.

Tableau 35 : mesures racinaires (en %) des individus échantillonnés dans la daya de Lekhneg.

Racines superficielles	RS	LTRS (cm)	CMRS (cm)	RRS
Mesures brutes	37	2183	17.22	219
%	61.67	62.16	60.23	64.99
Racines profondes	RP	LTRP (cm)	CMRP (cm)	RRP
Mesures brutes	23	1329	11.37	118
%	38.33	37.84	39.77	35.01
Totaux	NTR	LTR	CMR	RTR
Mesures brutes	60	3512	28.59	337
%	100	100	100	100
RS : nombre de racines superficielles ; RP : nombre de racines profondes ; LTR : longueur totale des racines (S : superficielles ; P : profondes); CMR : circonférences moyennes des racines (S : superficielles ; P : profondes) ; RR : nombre des ramifications des racines (S : superficielles ; P : profondes).				

Nous constatons que sur un total de 60 racines recensées dans cette population de pistachier de l'Atlas, 61,67% sont des racines superficielles et 38,33%, donc plus de 1/3, sont des racines profondes. Relativement, les mêmes proportions se retrouvent quant aux longueurs des racines profondes, leurs circonférences moyennes et même le nombre de leurs ramifications respectif.

### 3.4.2. Discussion

Les systèmes racinaires développés par les sujets de cette daya sont de type majoritairement généralisé. En effet, ils y investissent dans les racines superficielles mais aussi dans les racines profondes.

Les architectures racinaires exprimées ne sont liées apparemment ni à l'âge ni au sexe des individus. En effet, les femelles comme les mâles, les jeunes comme les plus âgés ont émis des racines superficielles et des racines profondes. Les différences dans les ratios devraient être investiguées dans les interactions avec les variables édaphiques.

Les travaux de Boubrima (2014) sur les architectures racinaires du pistachier de l'Atlas dans les dayas de Saadi (Hassi Delâa) et Aiat (Timzerth) ont révélé que les jeunes sujets expriment un pivot orthogéotrope rectiligne, portant plusieurs racines latérales et fines, il évolue par la suite en un système racinaire vigoureux, à enracinement superficiel et profond.

Les travaux de Hamitouche (2016) ont abouti à des conclusions similaires. En effet, lors de ses travaux sur les pistachiers de l'Atlas de la daya d'El Gouffa, il a conclu que les jeunes et moyens sujets montrent des pivots bien individualisés à pénétration assez profonde. Leurs racines superficielles sont aussi bien développées. Les sujets âgés possèdent un système racinaire mixte.

### 3.4.3. Corrélations statistiques des variables racinaires

Les résultats des tests de contingences statistiques entre les variables racinaires considérées, sont portés par le tableau 36.

Tableau 36 : résultats des tests de corrélations de Pearson confrontant les variables racinaires de la daya de Lekhneg.

	RS	LTRS	CMRS	RRS	RP	LTRP	CMRP	RRP
RS	1	-	-	-	-	-	-	-
LTRS	<b>0.92</b>	1	-	-	-	-	-	-
CMRS	0.72	<b>0.81</b>	1	-	-	-	-	-
RRS	<b>0.85</b>	<b>0.92</b>	0.54	1	-	-	-	-
RP	0.19	0.46	0.59	0.24	1	-	-	-
LTRP	0.23	0.46	0.67	0.22	<b>0.96</b>	1	-	-
CMRP	0.20	0.24	0.64	0.04	0.06	0.26	1	-
RRP	0.11	0.29	0.54	0.04	<b>0.91</b>	<b>0.97</b>	0.18	1
<i>En gras, valeurs significatives (hors diagonale) au seuil alpha=0.05 (test bilatéral)</i>								
RS : nombre de racines superficielles ; RP : nombre de racines profondes ; LTR : longueur totale des racines (S : superficielles ; P : profondes); CMR : circonférences moyennes des racines (S : superficielles ; P : profondes) ; RR : nombre des ramifications des racines (S : superficielles ; P : profondes).								

Concernant les racines superficielles, nous constatons que leur nombre est positivement corrélé à leur longueur totale et aux nombre total de leurs ramifications.

Cependant, leur longueur totale montre une corrélation positive avec leurs circonférences moyennes et le nombre de leurs ramifications.

Quant aux racines profondes, leur nombre est positivement corrélé à leur longueur totale et le nombre de leurs ramifications. Ces deux dernières variables étant positivement corrélées.

### 3.4.4. Conclusions

D'après les corrélations statistiques des variables racinaires, il apparaît un comportement presque similaire des deux types de racines (superficielles et profondes). En effet, quand le nombre des racines superficielles augmente, elles s'allongent et se ramifient. En s'allongeant, ces racines superficielles s'épaississent. Quant aux racines profondes, quand leur nombre augmente, elles s'allongent et se ramifient, mais les tests statistiques ne montrent pas de significativité de leurs circonférences moyennes avec une quelconque variable racinaire.

## 3.5. Interaction sol / système racinaire

### 3.5.1. Résultats

Les résultats des tests de corrélations de Pearson obtenus (Tableau 37) montrent que le nombre de racines superficielles est positivement corrélé aux taux d'argiles et de limons totaux (surtout les limons fins) de ces sols. Mais sont corrélées négativement aux taux de sables totaux (surtout les taux de sables fins).

Tableau 37 : résultats des tests de corrélations de Pearson confrontant les variables pédologiques et racinaires de la daya de Lekhneg.

	A	LF	LG	LT	SF	SG	ST	CaCO <sub>3</sub>	CR	MO
RS	<b>0.88</b>	<b>0.84</b>	0.79	<b>0.90</b>	<b>-0.85</b>	-0.56	<b>-0.90</b>	0.58	0.79	-0.62
LTRS	<b>0.91</b>	<b>0.97</b>	0.76	<b>0.95</b>	<b>-0.92</b>	-0.56	<b>-0.95</b>	0.66	<b>0.93</b>	-0.60
CMRS	0.59	<b>0.85</b>	0.30	0.65	<b>-0.88</b>	0.00	-0.63	0.75	0.67	-0.73
RRS	<b>0.98</b>	<b>0.88</b>	<b>0.86</b>	<b>0.95</b>	<b>-0.82</b>	-0.77	<b>-0.99</b>	0.41	<b>0.92</b>	-0.47
RP	0.17	0.43	0.09	0.30	-0.35	0.02	-0.24	0.50	0.39	-0.16
LTRP	0.21	0.43	-0.04	0.23	-0.45	0.19	-0.22	0.39	0.30	-0.40
CMRP	0.17	0.39	-0.35	0.05	-0.57	0.56	-0.11	0.23	0.11	-0.75
RRP	0.04	0.23	-0.17	0.05	-0.28	0.30	-0.04	0.25	0.09	-0.33
<i>En gras, valeurs significatives au seuil alpha=0.05 (test bilatéral)</i>										
RS : nombre de racines superficielles ; RP : nombre de racines profondes ; LTR : longueur totale des racines (S : superficielles ; P : profondes); CMR : circonférences moyennes des racines (S : superficielles ; P : profondes) ; RR : nombre des ramifications des racines (S : superficielles ; P : profondes). A : taux d'argiles (%); LF : limons fins (%); LG : limons grossiers (%); LT : limons totaux (%); SF : sables fins (%); SG : sables grossiers (%); ST : sables totaux (%); CaCO <sub>3</sub> : taux de calcaire total (%); CR : capacité de rétention en eau (%); MO : taux de matière organique (%).										

Les longueurs totales des racines superficielles sont corrélées positivement aux taux d'argiles, de limons totaux (surtout les limons fins), mais aussi avec la capacité de rétention en eau de ces sols. Leur corrélation est négative avec les taux de sables totaux (les sables fins en particulier).

Les circonférences moyennes des racines superficielles sont positivement corrélées aux limons fins, mais négativement aux sables fins.

Le nombre de ramifications des racines superficielles est positivement corrélé aux fractions fines des sols échantillonnés. En effet, nous constatons une corrélation positive avec les taux d'argiles et des limons totaux (fins et grossiers). A l'image de leurs longueurs, les ramifications de ce type de racine sont positivement corrélées à la capacité de rétention en eau des sols.

Pour une meilleure visibilité des interactions entre ces variables, nous avons réalisé une ACP (Fig. 59) qui montre les contributions de celles-ci selon les axes principaux de l'hyperespace statistique.

Les deux axes F1 et F2 expliquent à eux seuls 80% de l'inertie totale enregistrée. Nous pouvons visualiser deux ensembles : A et B.

L'ensemble A montre que la capacité de rétention en eau de ces sols est suivie de près par un cortège hétéroclite formé des fractions granulométriques fines de ces sols (argiles, limons fins et limons grossiers), du nombre de racines superficielles et de deux de leurs critères dimensionnels (longueurs totales et nombre de ramifications). Proche de ce groupe 1, nous constatons un groupe 2 composé du nombre de racines profondes autour duquel s'agrègent tous leurs critères dimensionnels (longueur totale, circonférences moyennes et nombre de ramifications), mais en plus les circonférences moyennes des racines superficielles. Le taux de calcaire total est à la charnière de ces deux groupes.

Nous constatons que parmi tous les individus appartenant à l'ensemble A aucun n'appartient à la classe d'âge des très jeunes individus. En effet, les individus recensés sont soit jeunes (cas du sujet LE5), soit relativement âgés (cas du sujet LE6) ou âgés (cas des sujets LE1 et LE2). Par ailleurs, nous y retrouvons autant de mâles que de femelles.

Quant à l'ensemble B, il rassemble les fractions sableuses des sols et leurs taux de matière organique. Nous constatons qu'ils évoluent à l'opposé de l'ensemble A. Deux sujets appartenant exclusivement à la classe d'âge des très jeunes sujets adhèrent à cet ensemble. En effet, ce sont les sujets immatures (LE3 et LE4).

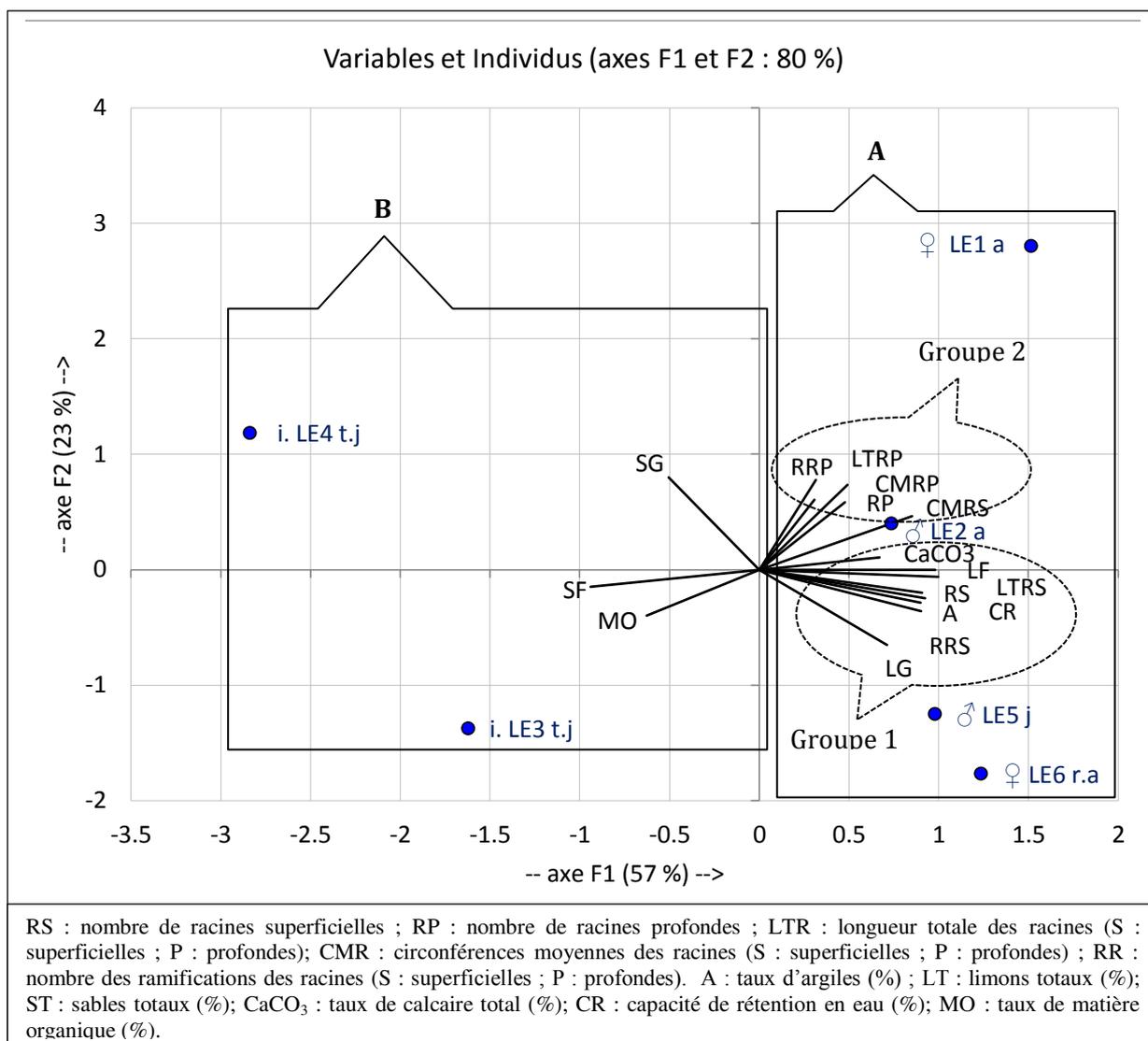


Fig. 59 : ACP montrant les contributions des variables pédologiques et racinaires des individus échantillonnés dans la daya de Lekhneg.

### 3.5.2. Discussion

La daya de Lekhneg est située selon le climagramme d'Emberger dans l'étage saharien tempéré et qu'elle traverse une durée de saison sèche de 11 mois par an. Paradoxalement, cette daya constitue un biotope « insolite » dans ce milieu pour le moins aride.

En effet, la fraction fine de ses sols (argiles + limons totaux) est en moyenne très appréciable atteignant plus de 31,59% dans ces sols et participant à des rétentions d'eau dépassant les 27% en moyenne du volume des sols échantillonnés. Ces fractions fines se chargent de retenir l'eau des rares humidités qui se présenteraient (principalement : pluies saisonnières, rosées et remontées capillaires). Ces humidités potentielles sont certes loin

d'être suffisantes en soi vu la sécheresse qui caractérise ces régions. Cependant, la forme en dépression de la daya permet de collecter par effet « entonnoir » plus d'eau que les milieux environnants.

Dans les conditions pédologiques de cette daya, tous les individus (excepté LE4) ont investi en moyenne, plus de 60% de leur biomasse racinaire pour l'élaboration et l'installation d'un système racinaire superficiel avantageux. En effet, le système racinaire superficiel est favorisé par rapport à celui profond comme décrit précédemment et rapportés par Schenk et Jackson (2002b), puis par Raimbault (2003).

Tous les individus échantillonnés dans la daya de Lekhneg ont alloué une biomasse conséquente, atteignant plus de 38% dans l'émission de racines profondes (100% dans le cas du sujet LE4). Ces mêmes racines profondes constituent plus de 37% des longueurs racinaires, plus de 39% des circonférences racinaires et enfin 35% des ramifications racinaires. Cet investissement certes coûteux en carbone, révèle l'importance de ces racines profondes dans le pourvoi des pistachiers de l'Atlas en eau dans cette daya.

L'ACP a montré la singularité des sujets LE3 et LE4 par rapport au reste de l'échantillon. En effet, le sujet LE3 même s'il a émis presque autant de racines superficielles que de racines profondes (4 et 3 respectivement), il n'empêche que ses mensurations racinaires sont les plus faibles de l'échantillon. Mais son sol est en moyenne le plus riche en matière organique et en sable fins. Le sujet LE4 n'a pas émis de racines superficielles, ce qui pourrait s'expliquer par le fait que ses niveaux de sol superficiels sont très riches en sables. Leur capacité de rétention en eau n'étant pas conséquente (le niveau 0-20 du sol LE4 a montré la plus faible capacité de rétention en eau), l'eau percolerait rapidement vers les profondeurs. L'investissement d'une biomasse racinaire coûteuse dans des niveaux qui s'assècheraient rapidement (faibles capacité de rétention en eau et directement exposés aux radiations) serait évidemment inadéquat. L'investissement en biomasse racinaire s'est orienté dès lors vers ces niveaux profonds plus humides et protégés de l'évaporation par les couches superficielles à faible conductance thermique, montrant du coup la flexibilité adaptative du système racinaire du pistachier de l'Atlas.

Par ailleurs, il est important de rappeler que ces deux sujets sont très jeunes. Les architectures racinaires qu'ils ont développées à ce stade de leur croissance sont en adéquation avec le rythme naturel de leur développement. De plus, le choix de leurs biotopes *a priori* désavantageux, pourrait être le résultat de pressions de compétition (intra et interspécifique) qui les a repoussés vers les nebkhas (ou leurs périphéries) sableuses. En effet les sols sous

pistachiers de leurs nebkhas sont les plus sableux (77,04% et 85,68% respectivement) et de ce fait les moins rétenteurs en eau.

La majorité (5/6) des individus échantillonnés de la daya de Lekhneg ont exprimé une architecture racinaire de type généralisé (racines superficielles et racines profondes). Des travaux similaires sur des populations de la même région (Laghout) ont abouti aux mêmes constatations. En effet, les travaux de Boubrima (2014) sur les systèmes racinaires des populations de dayate Saadi à Hassi Delaâ et dayate Aiate à Timzerth, ainsi que les travaux de Hamitouche (2016) sur la population de dayate El Gouffa à Ain el Madhi ont décrits des systèmes racinaires de type généralisé surtout chez les individus âgés.

L'expression de ces architectures racinaires paraît ne pas dépendre du sexe des individus. Quant à l'âge, il apparaît que la pression de compétition a relégué les très jeunes individus vers les sols les moins avantageux, les plus âgés ayant occupé dès leurs jeunes âges les sols les mieux pourvoyeurs en eau.

Dans tous les cas, c'est l'environnement édaphique du système racinaire qui façonne l'expression de son architecture et l'oriente vers une distribution optimale et efficace pour l'exploitation des ressources, dont la disponibilité est variable dans l'espace et dans le temps.

#### 4. Station de Béni Ounif (Béchar)

##### 4.1. Caractéristiques des individus échantillonnés

Les principales caractéristiques des pistachiers de l'Atlas échantillonnés à la station de Béni Ounif sont illustrées par le tableau 38.

Tableau 38 : caractéristiques des individus échantillonnés à la station de Béni Ounif.

Stations et coordonnées	Code des Individus	Sexe	Hauteur (m)	Circonférence du tronc (cm)	Diamètre de couronne (m)
Béni Ounif 31° 48 .728 N 1° 44.871 O Alt.760.48 m	BO1	F	7	278	12
	BO2	M	20	374	11.44
	BO3	/	-	182	-
	BO4	F	11	229	12
	BO5	F	11	229	12.54
	BO6	M	10.5	280	12.27

BO<sub>n</sub> : individu n ; F : Femelle ; M : mâle.

L'échantillon est constitué de trois femelles et de deux mâles. Nous n'avons pas trouvé la partie aérienne du sujet BO3, nous ne pouvons donc déterminer son sexe. Nous avons trouvé un tronc de 1,5 m de hauteur et des jeunes feuilles bourgeonnantes à partir du collet.

#### 4.2. Estimation des classes d'âges relatifs des individus échantillonnés

Par le biais de la méthode de Liorzou (1956), nous avons obtenu les résultats consignés dans le tableau 39.

Dans cette population, nous n'avons pas trouvé de jeunes sujets comme ce fut le cas des populations précédentes. En effet, la population est constituée d'individus âgés. Le « plus jeune » parmi l'échantillon a une circonférence de tronc de 182 cm (cas du sujet BO3), par conséquent il ferai théoriquement partie de la classe des individus « âgés » dans les populations précédentes !, nous avons donc choisi en fonction du nombre de classes obtenues de les ordonner en une série croissante de telle façon que chaque classe contienne les individus d'âges similaires, qui seront plus âgés que les individus des classes inférieures et moins âgés que les individus des classes supérieures.

Tableau 39: classes des circonférences des troncs et âges relatifs des individus échantillonnés dans la station de Béni Ounif

$X_{i \min}$		182		Classes	n	Code individu	Classe d'âge/ (symboles)
$X_{i \max}$		375	1	[149.5–214.5 [	1	BO3	Âge 1/ $a_1$
Etendue de la classe	$d$	193	2	[214.5-279.5 [	3	BO1, BO4, BO5	Âge 2/ $a_2$
Nombre de classes	$k$	4	3	[279.5–344.5 [	1	BO6	Âge 3/ $a_3$
Amplitude d'une classe	$a$	65	4	[344.5-409.5 [	1	BO2	Âge 4/ $a_4$
Borne inférieure de la 1 <sup>ère</sup> classe	$Li$	149.5	Total		6	6	4
Borne supérieure de la 1 <sup>ère</sup> classe	$Ls$	214.5					

Les résultats obtenus montrent que l'échantillon de la population de Béni Ounif est constitué de 4 classes de circonférence de tronc. Nous considérons par analogie que cet échantillon est constitué de 4 classes d'âge. Les moins âgés occupent la première classe (Âge 1), ce qui est le cas du seul individu BO3, les plus âgés occuperont la quatrième classe d'âge (Âge 4), ce qui est le cas du seul individu BO2, en passant par les classes d'âges intermédiaires : Âge 2 (cas des trois individus : BO1, BO4 et BO5) et Âge 3 (cas de l'individu BO6).

#### 4.3. Caractéristiques pédologiques

##### 4.3.1. Résultats

Les analyses physiques et chimiques des sols sous pistachier de l'Atlas de cette station sont présentées dans deux tableaux. Le premier (Tableau 40) contient les résultats détaillés

obtenus pour les quatre niveaux de chaque profil pédologique réalisé sous chaque pistachier de l'Atlas échantillonné dans cette population. Le deuxième (Tableau 41) contient les moyennes des quatre niveaux de chaque sol sous pistachier de l'Atlas échantillonné.

#### **4.3.1.1. Texture**

Pour des milieux aussi arides, les teneurs en argiles sont assez importantes, avec une valeur moyenne de 9,16%, tous niveaux confondus. La plus faible valeur est celle du niveau (0-20 cm) du sol du sujet BO6 avec 3,71%, le niveau (0-20 cm) du sol des sujets BO3 et BO4 a présenté la plus grande teneur en argiles avec 16,68%.

Les limons fins sont aussi présents, mais en plus faibles quantités. En effet, en moyenne ils représentent presque le tiers des argiles, avec seulement 3,68% de teneur moyenne des niveaux analysés. Le niveau le plus riche est le (0-20 cm) du sol du sujet BO1 avec 10,49%, alors que le plus pauvre est le niveau (60-80 cm) du sol du sujet BO2, avec à peine 0,43%.

La fraction limoneuse grossière n'est pas plus importante que la précédente fraction, en effet, elle est présente avec une moyenne de 8.63%, tous niveaux confondus. La valeur la plus élevée se retrouve dans le niveau (40-60 cm) du sol du sujet BO5 avec 23,13%, alors que la plus faible est celle du niveau (60-80 cm) du sol des sujets BO3 et BO4, atteignant à peine 0,68%.

Les fortes teneurs en sables rappellent et confirment qu'on est bien dans des milieux sahariens. En effet, ils constituent en moyenne presque 80% de la fraction granulométrique de ses sols. Les sables fins présentent une légère dominance avec 44,40% de moyenne. Le niveau (0-20 cm) du sol du sujet BO5 en est le plus riche avec 72,53%, alors que le niveau (20-40 cm) du sol des sujets BO3 et BO4 en est le plus pauvre avec 4,54%. Quant aux sables grossiers, c'est le niveau (20-40 cm) du sol des sujets BO3 et BO4 qui détient la valeur maximale avec 84,24%, on est très loin des 2,80% de sables grossiers contenus dans le niveau (0-20 cm) du sol du sujet BO1.

Les textures des sols échantillonnés varient entre limono-sableuse et sablo-limoneuse ; dans deux cas, elle est sableuse comme les cas des niveaux (0-20 cm) et (20-40 cm) du sujet BO6.

En moyenne (Tableau 41 et Fig. 59), les sols sous pistachier de l'Atlas de cette station ont une forte composante sableuse avec 79,28%. Le sol du sujet BO6 a montré la plus haute valeur avec ses 83,75%. Le sol du sujet BO1 en a présenté la moins élevée avec ses 70,93%.

#### **4.3.1.2. Capacité de rétention en eau**

A part le niveau (0-20 cm) du sol du sujet BO2 qui a montré la capacité de rétention en eau la plus faible avec seulement 13,01%, tous les autres niveaux de sol dépassent

allègrement 20%, avec un maximum retrouvé chez le niveau (0-20 cm) du sol des sujets BO3 et BO4 qui a atteint 28,71%.

En moyenne (Tableau 41 et Fig. 60), les sols sous pistachier de l'Atlas de cette station ont une capacité de rétention en eau de 24,59%. La plus forte valeur a été enregistrée dans le sol du sujet BO1.

Tableau 40 : caractéristiques physiques et chimiques<sup>4</sup> des sols sous pistachier de l'Atlas de la station de Béni Ounif.

Sol	Niveaux (cm)	A	LF	LG	SF	SG	Texture	CR	pH	CaCO <sub>3</sub>	MO
BO1	0-20	7.26	<b>10.49</b>	20.06	59.39	<b>2.80</b>	LS	25.39	8.11	<b>83.75</b>	1.90
	20-40	10.80	3.49	14.34	64.31	7.06	LS	27.84	8.10	11.88	1.64
	40-60	15.02	6.48	2.10	65.17	11.23	LS	27.29	8.00	13.13	1.53
	60-80	14.39	1.98	9.88	65.54	8.21	LS	26.57	8.06	13.75	2.12
BO2	0-20	3.75	7.35	9.81	54.65	24.44	SL	<b>13.01</b>	8.04	13.75	<b>0.69</b>
	20-40	13.15	4.66	3.05	65.33	13.81	LS	24.78	8.49	10.63	1.06
	40-60	10.86	1.44	5.94	69.37	12.38	SL	26.14	8.42	15.00	0.90
	60-80	8.76	<b>0.43</b>	6.81	57.20	26.80	SL	24.98	8.50	12.50	1.22
BO3 & BO4	0-20	<b>16.68</b>	5.30	21.49	40.27	16.26	LS	<b>28.71</b>	7.92	16.25	1.27
	20-40	8.28	1.98	0.97	<b>4.54</b>	<b>84.24</b>	SL	25.35	8.06	18.75	1.59
	40-60	9.50	3.67	5.95	9.37	71.51	LS	26.97	8.15	21.88	1.38
	60-80	11.33	2.41	<b>0.68</b>	8.11	77.47	SL	24.76	8.09	21.88	1.38
BO5	0-20	7.18	1.79	12.83	<b>72.53</b>	5.67	LS	24.88	<b>7.76</b>	<b>8.75</b>	1.90
	20-40	-	-	-	-	-	-	20.28	8.07	10.63	1.38
	40-60	7.05	0.58	<b>23.13</b>	24.26	44.98	LS	20.28	8.32	20.00	1.48
	60-80	4.08	1.92	3.81	32.05	58.15	SL	24.61	8.41	20.00	1.53
BO6	0-20	<b>3.71</b>	4.29	3.42	33.36	55.22	S	22.78	8.15	10.00	0.85
	20-40	4.83	0.99	2.30	16.98	74.91	S	23.70	8.05	10.63	1.43
	40-60	5.91	8.52	9.51	67.28	8.79	SL	28.17	8.54	<b>8.75</b>	1.48
	60-80	11.53	2.15	7.85	33.82	44.64	LS	25.28	<b>8.58</b>	13.13	<b>2.22</b>
<i>Moyennes</i>		<i>9,16</i>	<i>3,68</i>	<i>8,63</i>	<i>44,4</i>	<i>34,14</i>	<i>/</i>	<i>24,59</i>	<i>8,19</i>	<i>17,75</i>	<i>1,45</i>
<i>Ecart type</i>		<i>3.92</i>	<i>2.83</i>	<i>6.93</i>	<i>23.38</i>	<i>28.3</i>	<i>/</i>	<i>3,53</i>	<i>0,23</i>	<i>16.1</i>	<i>0.4</i>
<i>Erreur standard</i>		<i>0.9</i>	<i>0.65</i>	<i>1.69</i>	<i>5.36</i>	<i>6.49</i>	<i>/</i>	<i>0.79</i>	<i>0,05</i>	<i>3.6</i>	<i>0.09</i>
A : taux d'argiles (%); LF : limons fins (%); LG : limons grossiers (%); LT : limons totaux (%); SF : sables fins (%); SG : sables grossiers (%); ST : sables totaux (%); CaCO <sub>3</sub> : taux de calcaire total (%); CR : capacité de rétention en eau (%); MO : taux de matière organique (%).											

<sup>4</sup> Une erreur de manipulation lors des analyses granulométriques du sol du niveau (20-40cm) du sujet BO5 a abouti à des résultats erronés.

Tableau 41 : moyennes des caractéristiques physiques et chimiques des sols de la station de Béni Ounif.

Individus	A	LF	LG	LT	SF	SG	ST	Textures	CR	pH	CaCO <sub>3</sub>	MO
BO1	<b>11.87</b>	<b>5.61</b>	<b>11.60</b>	<b>17.20</b>	<b>63.60</b>	<b>7.32</b>	<b>70.93</b>	Limono-sableuse	26.77	8.06	30.63	1.80
BO2	9.13	3.47	6.40	9.87	61.64	<b>19.36</b>	81	Limono-sableuse	22.23	8.36	12.97	0.97
BO3 & BO4	11.45	3.34	7.27	10.61	<b>15.57</b>	62.37	77.94	Limono-sableuse	26.44	8.05	19.69	1.40
BO5	6.10	<b>1.43</b>	13.26	<b>14.69</b>	42.95	36.27	79.21	Sablo-limoneuse	22.51	8.14	10.63	1.57
BO6	<b>6.49</b>	3.99	<b>5.77</b>	9.76	37.86	45.89	<b>83.75</b>	Sablo-limoneuse	24.98	8.14	10.63	1.49
<b>Moyennes</b>	<b>9.01</b>	<b>3.57</b>	<b>8.86</b>	<b>12.43</b>	<b>44.32</b>	<b>34.24</b>	<b>79.57</b>	<b>Sablo-Limoneuse</b>	<b>24.57</b>	<b>8.2</b>	<b>17.75</b>	<b>1.45</b>

A : taux d'argiles (%); LF : limons fins (%); LG : limons grossiers (%); LT : limons totaux (%); SF : sables fins (%); SG : sables grossiers (%); ST : sables totaux (%); CaCO<sub>3</sub> : taux de calcaire total (%); CR : capacité de rétention en eau (%); MO : taux de matière organique (%).

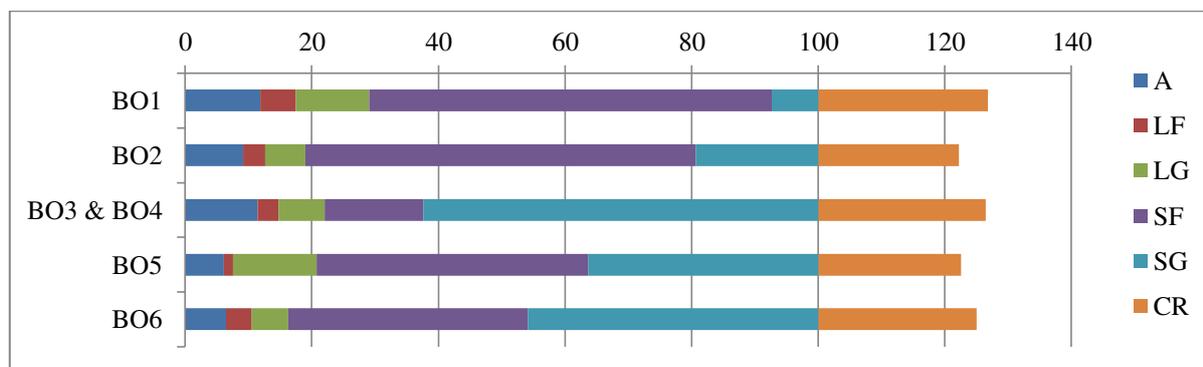


Fig. 60 : moyennes des constituants granulométriques et des capacités de rétention de chaque sol sous pistachier de l'Atlas échantillonné à la station de Béni Ounif.

#### 4.3.1.3. pH

Le pH des sols analysés, varie entre un minimum de 7,76 du niveau (0-20 cm) du sol du sujet BO5 et 8,58 du niveau (60-80 cm) du sol du sujet BO6.

En moyenne (Tableau 41 et Fig. 61), les sols sous pistachier échantillonnés ont un pH de 8,20. Le plus élevé est celui du sol du sujet BO2 avec 8,36, alors que le moins élevé est celui des sols des individus BO3 et BO4 avec un pH de 8,05.

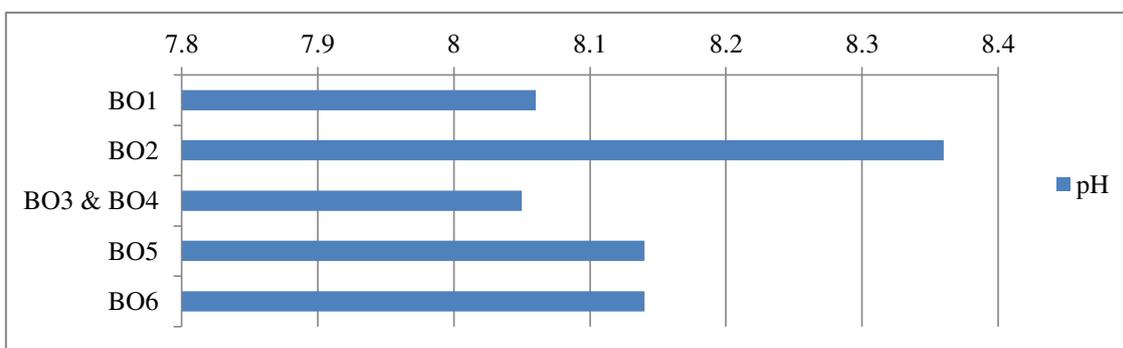


Fig. 61 : moyennes des pH des sols sous pistachier de l'Atlas de la station de Béni Ounif.

#### 4.3.1.4. Taux de calcaire total

La teneur minimale en calcaire total est de 8,75% et a été trouvée dans les niveaux (0-20 cm) et (40-60 cm) des sols des sujets BO5 et BO6 respectivement. Le maximum, avec une valeur exceptionnelle de 83,75%, se retrouve dans le niveau (0-20 cm) du sol du sujet BO1.

En moyenne (Tableau 41 et Fig. 62), les sols échantillonnés ont un taux de calcaire total de 17,75%. Le taux le plus élevé est celui du sol du sujet BO1 avec 30,63%, alors que le plus bas est celui du sol du sujet BO6 avec 10,63%.

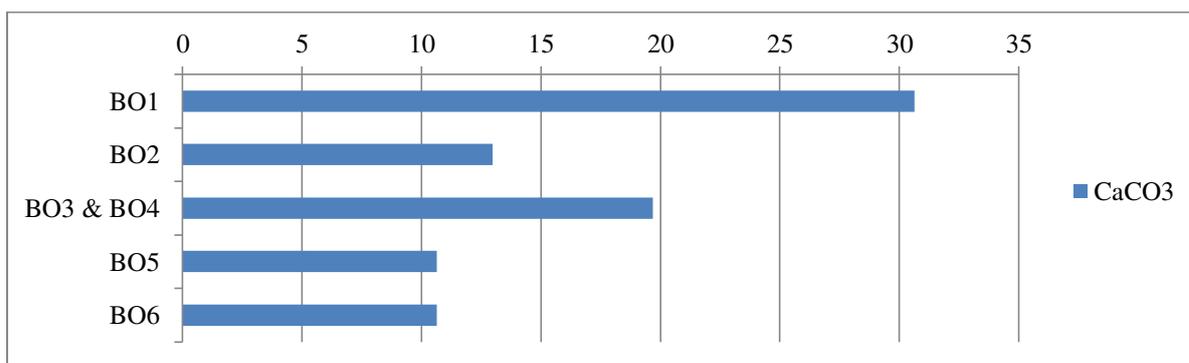


Fig. 62 : moyennes des taux de calcaire total des sols échantillonnés à la station de Béni Ounif.

#### 4.3.1.5. Taux de matière organique

La teneur la plus basse en matière organique est celle retrouvée dans le niveau (20-40 cm) du sol du sujet BO2 et estimée à 0.69%. Le niveau (60-80 cm) du sol du sujet BO6 en est le plus pourvu, mais restant quand même faible avec 2.22%.

En moyenne (Tableau 41 et Fig. 63), la teneur en matière organique de ces sols sous pistachier de l'Atlas est de 1,45%. La teneur la plus élevée est celle du sol du sujet BO1 avec

1,80%, tandis que la plus faible est celle du sol du sujet BO2 avec 0,97% de matière organique.

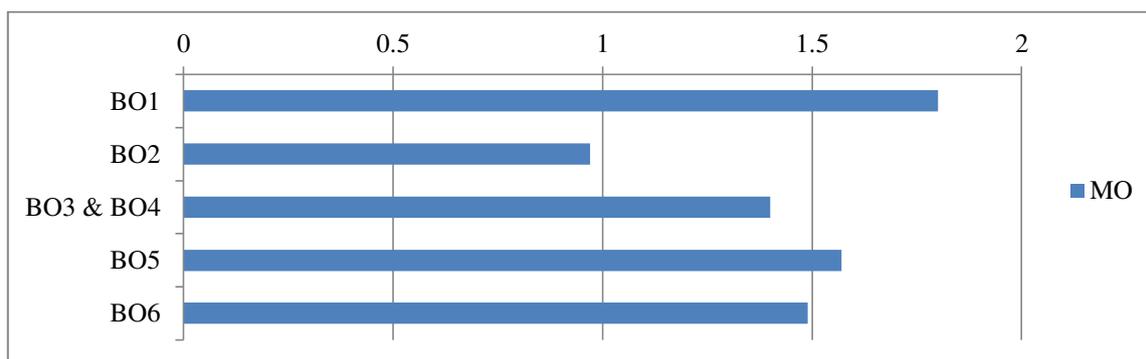


Fig. 63: moyennes des taux de matière organique des sols échantillonnés à la station de Béni Ounif.

#### 4.3.2. Corrélation statistique des variables pédologiques

Les tableaux 42 et 43 regroupent les résultats des tests de corrélation de Pearson appliqués aux variables pédologiques considérées.

Nous constatons que les taux d'argiles de ces sols sont positivement corrélés à leurs taux de calcaire total. Ces derniers sont négativement corrélés aux taux des sables totaux. Les taux de sables grossiers sont inversement corrélés aux taux de sables fins. Quant à la capacité de rétention en eau de ces sols, elle montre une corrélation négative avec les pH des sols échantillonnés.

Tableau 42: tableau des corrélations entre les variables pédologiques des sols sous pistachiers de l'Atlas de la station de Béni Ounif (a).

	A	LF	LG	SF	SG	CR	pH	CaCO <sub>3</sub>	MO
A	1	-	-	-	-	-	-	-	-
LF	0.57	1	-	-	-	-	-	-	-
LG	-0.11	-0.20	1	-	-	-	-	-	-
SF	-0.19	0.35	0.33	1	-	-	-	-	-
SG	0.04	-0.43	-0.42	<b>-0.98</b>	1	-	-	-	-
CR	0.72	0.62	-0.13	-0.44	0.31	1	-	-	-
pH	-0.40	-0.18	-0.27	0.58	-0.45	<b>-0.83</b>	1	-	-
CaCO <sub>3</sub>	<b>0.85</b>	0.73	0.26	0.12	-0.29	0.75	-0.53	1	-
MO	0.08	0.30	0.64	0.02	-0.13	0.53	-0.77	0.52	1

*En gras, valeurs significatives (hors diagonale) au seuil alpha=0.05 (test bilatéral)*

A : taux d'argiles (%); LF : limons fins (%); LG : limons grossiers (%); SF : sables fins (%); SG : sables grossiers (%); CaCO<sub>3</sub> : taux de calcaire total (%); CR : capacité de rétention en eau (%); MO : taux de matière organique (%).

Tableau 43 : tableau des corrélations entre les variables pédologiques des sols sous pistachiers de la station de Béni Ounif (b).

	A	LT	ST	CR	pH	CaCO <sub>3</sub>	MO
A	1	-	-	-	-	-	-
LT	0.13	1	-	-	-	-	-
ST	-0.71	-0.80	1	-	-	-	-
CR	0.72	0.14	-0.54	1	-	-	-
pH	-0.40	-0.34	0.49	<b>-0.83</b>	1	-	-
CaCO <sub>3</sub>	<b>0.85</b>	0.58	<b>-0.93</b>	0.75	-0.53	1	-
MO	0.08	0.76	-0.60	0.53	-0.77	0.52	1
<i>En gras, valeurs significatives au seuil alpha=0.05 (test bilatéral)</i>							
A : taux d'argiles (%) ; LT : limons totaux (%) ; ST : sables totaux (%) ; CaCO <sub>3</sub> : taux de calcaire total (%) ; CR : capacité de rétention en eau (%) ; MO : taux de matière organique (%).							

La distribution selon la profondeur des variables pédologiques principales des sols échantillonnés (Fig. 64), montre que leurs capacités de rétention augmentent en profondeur en même temps qu'augmente les taux d'argiles, de matière organique et un peu moins celui des sables totaux. Les taux des limons totaux et de calcaire total tendent à diminuer dans le même sens (particulièrement celui des limons totaux). Les courbes de tendances ainsi que leurs coefficients de corrélation respectifs montrent les degrés de significativité de ces évolutions.

#### 4.3.3. Discussion

Les textures des sols échantillonnés à Béni Ounif varient entre limono-sableuse et sablo-limoneuse. Les travaux de Bournine (2007) dans la même région (Béni Ounif) ont montré que la texture des sols sous pistachier de l'Atlas échantillonnés est généralement purement sableuse et devient sablo-limoneuse dans le sol rhizosphérique. Selon Dutil (1971), les sols minéraux bruts d'apport constituent le type de sol le plus souvent rencontré dans les oueds ; ces sols d'apport étant les sols dont l'action éolienne a provoqué l'accumulation plus ou moins importante d'éléments sableux (surtout sables moyens et sables fins) en certains points.

Les capacités de rétention de ces sols varient entre 13,01% et 28,71% ce qui confirme celles trouvées par Ait Slimane (2004) dans la même région (Béni Ounif) et qui a relevé des valeurs presque identiques comprises entre 13% et 28,4%. Dans des régions aussi arides, ces capacités de rétention sont pour le moins conséquentes car selon Rognon (1994), les très fortes dessiccations, souvent répétées, diminuent la capacité de rétention en eau des sols, donc accentuent encore les effets de la sécheresse.

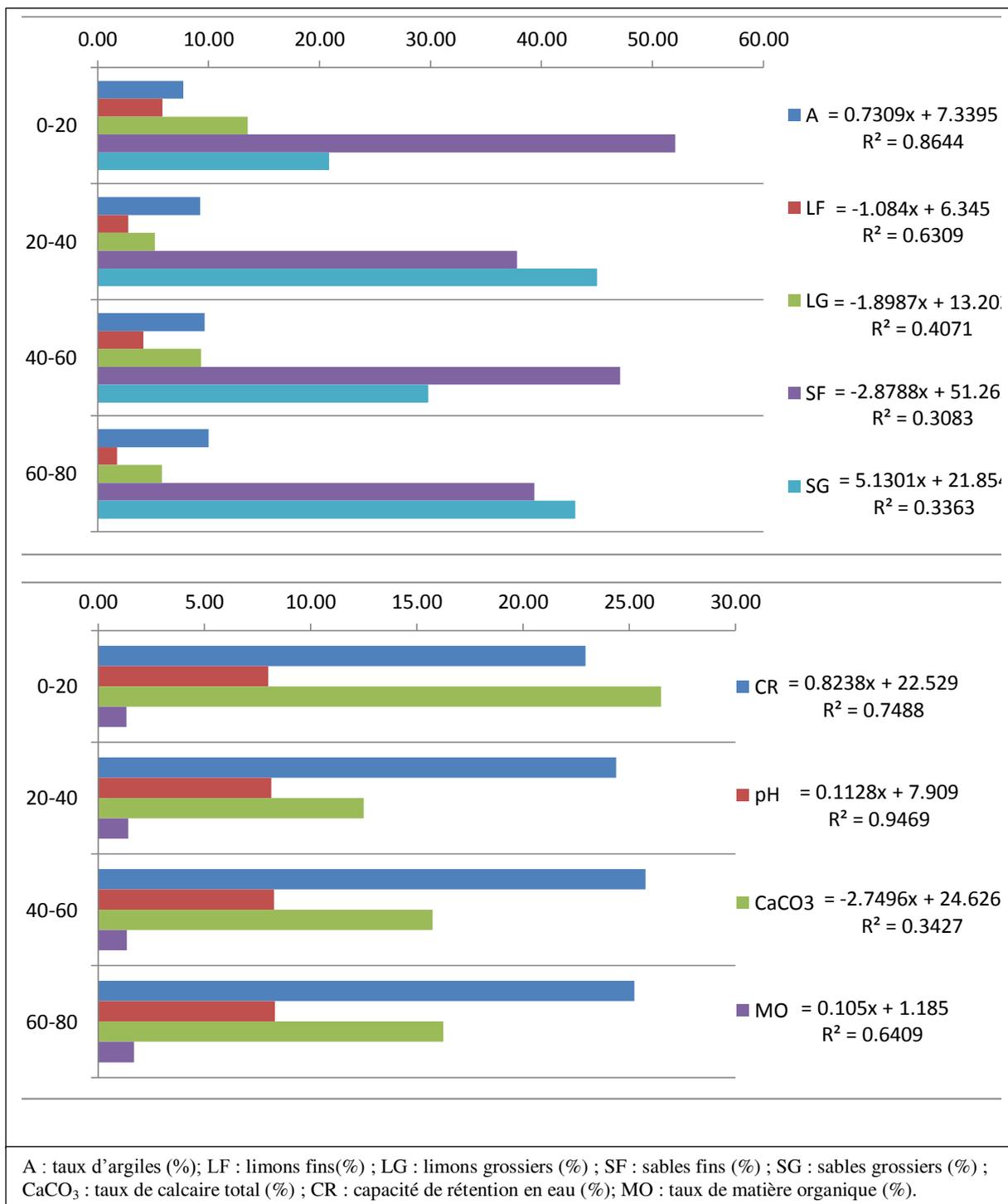


Fig. 64 : évolution selon la profondeur des variables pédologiques des sols sous pistachiers de l'Atlas de la station de Béni Ounif.

Les pH enregistrés dans ces sols sous pistachier de l'Atlas varient entre 7,76 et 8,58, donc jugés selon l'estimatif considéré (Baize, 2000) basiques. Les travaux de Bournine (2007)

dans la même région ont montré des pH compris entre 8,09 et 8,46, donc aussi basiques. Quant aux taux de calcaire total de ces sols, ils varient entre 8,75% (modérément calcaire) et 83,75% (excessivement calcaire). D'après Pouget (1980b), que ce soit le substratum géologique (roche en place) ou les dépôts secondaires (alluvions, colluvions, dépôts éoliens), la quasi-totalité des matériaux sur lesquels se sont formés et évoluent les sols des zones arides, se caractérise par la présence de calcaire, très souvent aussi de gypse et de sels. Il en résulte des pH basiques, parfois proches de la neutralité et des complexes absorbants saturés. D'après Rognon (1994), ces pH élevés sont un facteur défavorable à la mobilité de nombreux éléments traces, qui ont un grand rôle physiologique au niveau des plantes. Une augmentation du pH bloque l'absorption de ces éléments sous des formes oxydées que les plantes ne peuvent pas assimiler.

Les taux de matière organique dans les niveaux analysés varient entre 0,69% (extrêmement faible) et 2,22% (faible). Bournine (2007) a rapporté des teneurs variant entre 0,98% dans le sol global et 1,65% dans le sols rhizosphérique, donc presque aussi faibles que celles que nous avons trouvées. D'après Pouget (1980b), la teneur en matière organique, sous la dépendance des précipitations, diminue plus ou moins régulièrement avec l'aridité croissante du climat. La végétation naturelle, pratiquement seule source de matière organique est indispensable à la formation et à l'évolution des sols. Synthétisée au niveau des organes aériens, elle est restituée au sol sous forme de litière ou, par la décomposition sur place du système racinaire. Selon Ozenda (2004), la teneur en matière organique de ce type de sols est très faible.

#### **4.4. Caractéristiques racinaires**

##### **4.4.1. Résultats**

Les profils racinaires réalisés sur les pistachiers de l'Atlas échantillonnés dans cette station sont illustrés par la figure 65. Quant aux résultats bruts des différentes mesures racinaires obtenues sont consignés dans le tableau 44.

Nous y constatons que le sujet BO2 n'a émis exclusivement que des racines superficielles, alors que tous les autres sujets échantillonnés ont émis presque autant de racines superficielles que de racines profondes, exception faite du sujet BO4. En effet, ce dernier a émis 13 racines superficielles qui totalisent à elles seules le maximum des longueurs et des ramifications racinaires enregistrées. Les racines superficielles du sujet BO1 sont les plus épaisses de l'échantillon, mais cependant les moins ramifiées parmi les racines superficielles.



Fig. 65 : systèmes racinaires des sujets échantillonnés dans la station de Béni Ounif (Mars 2010). (Photos : Limane).

Tableau 44: résultats des mesures racinaires des individus échantillonnés à Béni Ounif.

Sujets	RS	LTRS (cm)	CMRS (cm)	RRS	RP	LTRP (cm)	CMRP (cm)	RRP
BO1 ♀ (a <sub>2</sub> )	7	<b>832</b>	<b>43.33</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>269</b>	25.33	<b>0</b>
BO2 ♂ (a <sub>4</sub> )	7	4297	30.55	35	<b>0</b>	0	0	<b>0</b>
BO3 ? (a <sub>1</sub> )	7	1489	<b>19.28</b>	19	<b>6</b>	1547	20.5	27
BO4 ♀ (a <sub>2</sub> )	<b>13</b>	<b>5194</b>	20.26	<b>96</b>	2	288	<b>19</b>	13
BO5 ♀ (a <sub>2</sub> )	7	4944	41.47	38	5	<b>1928</b>	<b>27.95</b>	<b>72</b>
BO6 ♂ (a <sub>3</sub> )	<b>6</b>	1610	24.17	32	5	548	23.2	19

RS : nombre de racines superficielles ; RP : nombre de racines profondes ; LTR : longueur totale des racines (S : superficielles ; P : profondes) ; CMR : circonférences moyennes des racines (S : superficielles ; P : profondes) ; RR : nombre des ramifications des racines (S : superficielles ; P : profondes) ; classe d'âges : a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub>, a<sub>3</sub>, a<sub>4</sub>.

Pour une meilleure lisibilité de ces résultats, nous les avons pondérés en procédant à leur transformation en pourcentage, ce qui nous a permis d'obtenir le tableau 45.

Tableau 45 : mesures racinaires brutes et en % des pistachiers de l'Atlas échantillonnés à Béni Ounif.

Racines superficielles	RS	LTRS (cm)	CMRS (cm)	RRS
Mesures brutes	47	18366	33.69	225
%	66.20	80.04	59.23	63.20
Racines profondes	RP	LTRP (cm)	CMRP (cm)	RRP
Mesures brutes	24	4580	23.19	131
%	33.80	19.96	40.77	36.80
Totaux	NTR	LTR	CMR	RTR
Mesures brutes	71	22946	56.88	356
%	100	100	100	100

RS : nombre de racines superficielles ; RP : nombre de racines profondes ; LTR : longueur totale des racines (S : superficielles ; P : profondes) ; CMR : circonférences moyennes des racines (S : superficielles ; P : profondes) ; RR : nombre des ramifications des racines (S : superficielles ; P : profondes).

Sur un total de 71 racines mesurées, 66,20% sont superficielles, donc colonisant les 50 premiers centimètres du sol sous pistachier de l'Atlas. Elles totalisent 80,04% des longueurs racinaires enregistrées, 59,23% des circonférences racinaires et 63,20% des ramifications totales racinaires.

Les racines profondes représentent les 33,80% des racines totales enregistrées (plus du tiers du système racinaire). Elles constituent presque 20% de la longueur totale racinaire et

plus de 36% des ramifications racinaires enregistrées. Malgré un effectif trois fois inférieur à celui des racines superficielles, les racines profondes ont une épaisseur conséquente atteignant plus de 40% des circonférences moyennes racinaires.

#### 4.4.2. Corrélations statistiques des variables racinaires

Le tableau 46 illustre les résultats du test de corrélation de Pearson appliqué aux variables racinaires.

Tableau 46 : résultats du test de corrélation de Pearson appliqué aux variables racinaires.

	RS	LTRS	CMRS	RRS	RP	LTRP	CMRP	RRP
RS	1	-	-	-	-	-	-	-
LTRS	0.57	1	-	-	-	-	-	-
CMRS	-0.38	-0.03	1	-	-	-	-	-
RRS	<b>0.89</b>	0.76	-0.47	1	-	-	-	-
RP	-0.41	-0.68	0.22	-0.56	1	-	-	-
LTR P	-0.26	0.05	0.09	-0.18	0.58	1	-	-
CMRP	-0.05	-0.30	0.26	-0.13	<b>0.86</b>	0.56	1	-
RRP	-0.15	0.36	0.23	0.05	0.36	<b>0.90</b>	0.54	1
<i>En gras, valeurs significatives (hors diagonale) au seuil alpha=0.05 (test bilatéral)</i>								
RS : nombre de racines superficielles ; RP : nombre de racines profondes ; LTR : longueur totale des racines (S : superficielles ; P : profondes) ; CMR : circonférences moyennes des racines (S : superficielles ; P : profondes) ; RR : nombre des ramifications des racines (S : superficielles ; P : profondes).								

Nous constatons des corrélations toutes positives entre le nombre de racines superficielles et le nombre de leurs ramifications ; entre le nombre de racines profondes et leurs circonférences moyennes racinaires ; et enfin entre les longueurs totales des racines profondes et leurs nombres de ramifications.

#### 4.4.3. Discussion

D'après les résultats obtenus, il apparaît que les architectures racinaires ne sont pas déterminées par le sexe puisque parmi les sujets ayant développés des systèmes racinaires généralisés, il y a des femelles et des mâles. Quant à l'âge, nous constatons que le seul individu considéré comme le plus âgé de l'échantillon, en l'occurrence le sujet BO2 (classe d'âge a<sub>4</sub>) n'a développé que des racines superficielles. Le reste de l'échantillon appartient aux trois classes d'âges (a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub> et a<sub>3</sub>) où l'on constate un système racinaire de type généralisé.

Ait Slimane (2004) est arrivée aux mêmes conclusions ; en effet, elle a montré que les systèmes racinaires du pistachier de l'Atlas échantillonnés à Béni Ounif sont de type extensif, donc développent des racines superficielles et des racines profondes.

Les corrélations statistiques montrent une coordination entre les caractéristiques racinaires. En effet, on y constate que quand le nombre racines superficielles augmente, elles

se ramifient, mais concernant les racines profondes, quand leur nombre augmente, elles s'épaississent, et quand elles s'allongent, elles se ramifient.

#### 4.5. Interaction sol / système racinaire

##### 4.5.1. Résultats

La confrontation des variables pédologiques et celles racinaires des individus de cette station a été réalisée par le biais des tests de corrélation de Pearson, dont les résultats sont illustrés par le tableau 47.

Tableau 47 : corrélations entre les variables pédologiques et les variables racinaires des pistachiers de l'Atlas de la station de Béni Ounif.

	RS	LTRS	CMRS	RRS	RP	LTRP	CMRP	RRP
A	0.48	-0.17	-0.10	0.05	0.05	-0.21	-0.04	-0.45
LF	-0.07	-0.71	0.00	-0.34	0.13	-0.70	-0.08	<b>-0.86</b>
LG	-0.05	-0.30	0.74	-0.40	0.47	0.04	0.46	-0.02
LT	-0.07	-0.57	0.53	-0.46	0.40	-0.32	0.29	-0.45
SF	-0.53	-0.14	0.80	-0.54	-0.14	-0.36	-0.25	-0.24
SG	0.46	0.22	-0.81	0.56	0.08	0.41	0.21	0.33
ST	-0.19	0.44	-0.28	0.26	-0.27	0.30	-0.16	0.50
CR	0.35	-0.56	-0.33	0.02	0.48	-0.15	0.43	-0.39
CaCO <sub>3</sub>	0.19	-0.41	0.37	-0.26	0.40	-0.14	0.33	-0.32
MO	-0.08	-0.46	0.45	-0.29	<b>0.83</b>	0.29	<b>0.92</b>	0.25
pH	-0.27	0.19	-0.02	-0.08	-0.75	-0.54	<b>-0.90</b>	-0.44
<i>En gras, valeurs significatives au seuil alpha=0.05 (test bilatéral)</i>								
RS : nombre de racines superficielles ; RP : nombre de racines profondes ; LTR : longueur totale des racines (S : superficielles ; P : profondes); CMR : circonférences moyennes des racines (S : superficielles ; P : profondes); RR : nombre des ramifications des racines (S : superficielles ; P : profondes). A : taux d'argiles (%); LF : limons fins (%); LG : limons grossiers (%); LT : limons totaux (%); SF : sables fins (%); SG : sables grossiers (%); ST : sables totaux (%); CaCO <sub>3</sub> : taux de calcaire total (%); CR : capacité de rétention en eau(%); MO : taux de matière organique (%).								

Nous constatons que le nombre de racines profondes est positivement corrélé à la teneur en matière organique de ces sols. Les circonférences moyennes des racines profondes sont d'une part positivement corrélées aux taux de matière organique, mais d'autre part, négativement corrélées aux pH de ces sols.

Pour rendre saisissables les interactions entre ces nombreuses variables, nous avons réalisé une ACP (Fig. 66) qui montre les contributions de celles-ci selon les axes principaux de l'hyperespace statistique.

Les deux axes F1 et F2 expliquent à eux seuls 60% de l'inertie totale. Nous constatons que selon l'axe F1, on peut discerner deux ensembles : A et B.

L'ensemble A contient un premier groupe de variables ; il s'agit d'un agrégat formé des taux d'argiles, de calcaire total et de celui des limons fins qui semblent accompagner de près la capacité de rétention en eau de ces sols. Le sujet BO3 est le seul à suivre de près ce groupe 1. Il s'agit du sujet le « moins âgé » de l'échantillon et dont le sol a montré le taux le bas en sables fins, ainsi que le pH le plus faible, mais aussi le taux le plus élevé en sables grossiers.

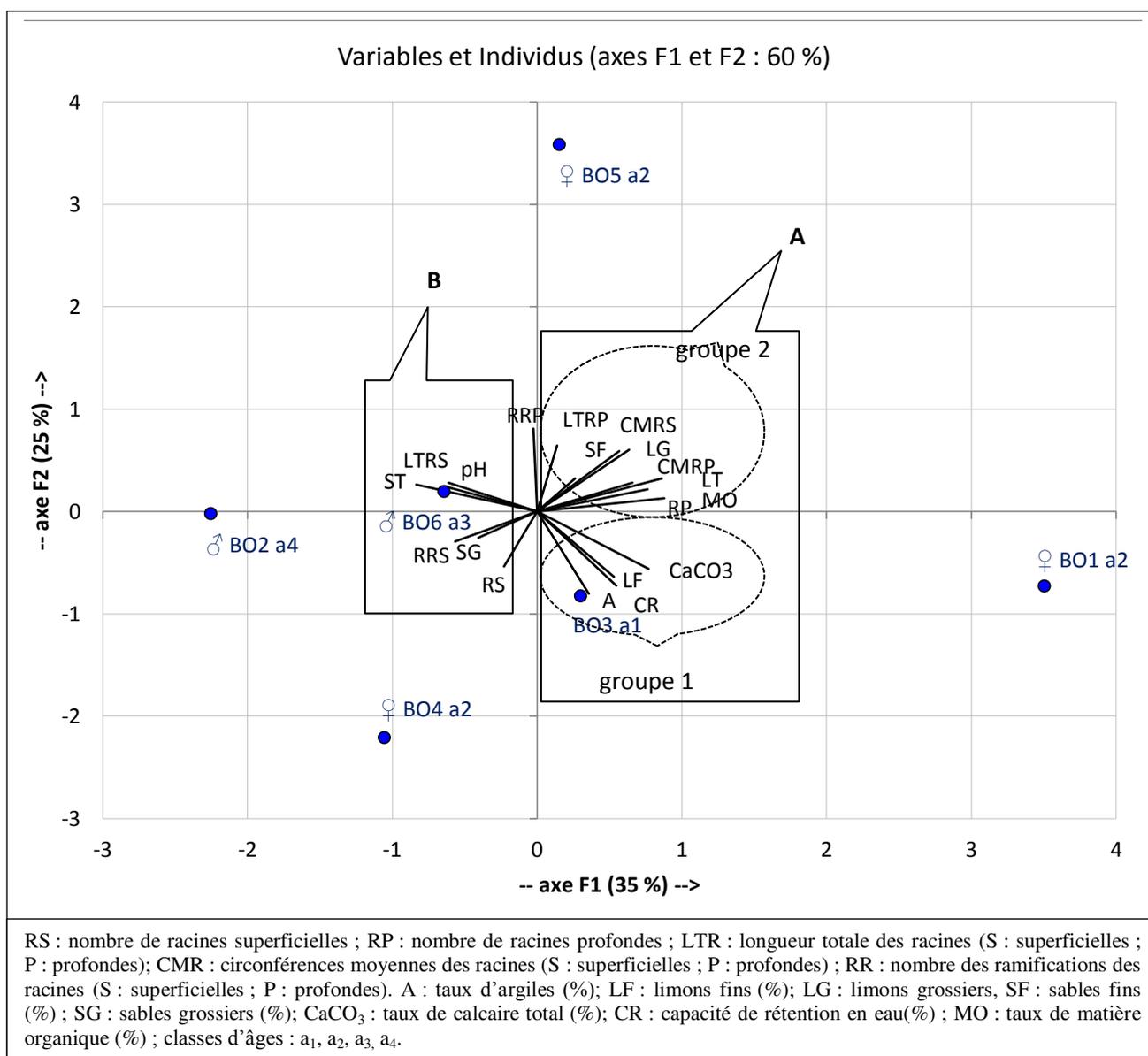


Fig. 66: ACP montrant la contribution des individus et des variables pédologiques et racinaires de la population de Béni Ounif.

Un deuxième groupe inclus dans cet ensemble A montre l'affinité du nombre, des longueurs totales et des circonférences moyennes des racines profondes, ainsi que les

circonférences moyennes des racines superficielles avec les taux des sables fins, des limons grossiers et de matière organiques de ces sols.

Cependant, le nombre de ramifications des racines profondes occupe une position charnière avec l'ensemble B qui rassemble la majorité des variables des racines superficielles : leurs nombre, leurs nombre de ramifications et leurs longueurs totales. Elles semblent suivre le taux de sables grossiers et le pH de ces sols.

Les individus de cet échantillon se comportent différemment selon les résultantes de leurs affinités avec les variables considérées. En effet, les excentricités respectives des individus BO1 et BO2 s'expliquent par le fait que pour le premier, son sol a les plus forts taux de calcaire total, de matière organique, mais aussi la plus forte capacité de rétention en eau de l'échantillon. Son système racinaire a presque autant de racines superficielles que de racines profondes. Quant au second (BO2), c'est le seul individu de l'échantillon qui n'a pas de racines profondes et n'a développé que des racines superficielles.

Le sujet BO4 suit les racines superficielles et leurs caractéristiques (excepté leurs circonférences moyennes). En effet, il est le sujet qui a le maximum de racines superficielles de l'échantillon (13 au total).

Le sujet BO6 ayant le sol le plus riche en sables suivra naturellement cette variable.

Le sujet BO5 occupe une position excentrée mais médiane entre les deux ensembles A et B. En effet, il a émis des racines superficielles et des racines profondes d'une part, mais a présenté les racines profondes les plus longues, les plus épaisses et enfin les plus ramifiées de l'échantillon.

Enfin, nous constatons que la distribution des individus selon les principaux axes de l'ACP ne montre pas d'affinité liée ni à l'âge, ni au sexe.

#### **4.5.2. Discussion**

La station échantillonnée se situe sur un lit d'oued (Fig. 66b), sujet à des régimes saisonniers intermittents, qui charrient vraisemblablement des quantités de matériaux (de différents tris granulométriques) arrachées aux reliefs environnants. Par décantation successives, des fractions pédologiques hétéroclites forment un sol d'apport secondaire. Nous retrouvons ainsi, des fractions fines dans les niveaux profonds ainsi constitués par accumulations successives. Ce qui expliquerait leur présence dans tous les niveaux de sol échantillonnés. A celle-ci s'ajoute une matière organique omniprésente dans les différents niveaux de sol (isohumisme), malgré sa teneur estimée faible. Ainsi structurée, ces sols offrent des capacités de rétention en eau conséquentes pour de tels milieux (24.59% en moyenne).

La station de Béchar rappelons-le, subit selon le climagramme d'Emberger un climat saharien tempéré avec 12 mois de saison sèche par an, les conditions sont pour le moins hyperarides (UNEP, 1992). Dans de telles conditions, les ressources en eaux se limitent exceptionnellement à des conjectures géologiques, topographiques et pédologiques providentielles. Le lit d'oued colonisé par cette population offrirait donc les conditions hydriques pour le pourvoi conséquent des pistachiers de l'Atlas qui atteignent pour quelques-uns près de 20 mètres de hauteur (cas du sujet BO2).



Fig. 66b : vue du lit d'oued où végètent une partie de la population de pistachier de l'Atlas échantillonnée (Mars 2010). (Photo : Limane).

Tous les sujets échantillonnés colonisent les 50 premiers centimètres du sol en y investissant en moyenne plus de 60% de leur biomasse racinaires (100% pour le cas du sujet BO2). Ceci confirme l'intérêt stratégique de ce type de racine même dans ces biotopes arides ainsi qu'argumenté par Lynch (1995), Adiku *et al.*, (2000), Raimbault (2003) et par Schenk et Jackson (2002b).

Ces racines superficielles sont longues (80,04% des longueurs totales racinaires) et très ramifiées (63,20% des ramifications totales racinaires), leur permettant d'exploiter d'une façon optimale les humidités potentielles qui s'y trouvent. En effet, d'après Rognon (1994), ces racines forment un horizon « racinaire » de plus en plus important, puisque la prospection de grands volumes de sol devient vitale pour l'alimentation en eau des végétaux ; la lixiviation est surtout freinée à leur niveau. Selon Ozenda (1991), les plantes des milieux arides forment un réseau horizontal courant à peu de distance de la surface et pouvant utiliser à la fois l'eau de pluie et celle des condensations lorsqu'il s'en produit.

Rappelons que dans cette station, les eaux de pluies sont très rares (P cumulée est de 75.92 mm/an seulement et P moyenne est de 6.31 mm/mois). Même à supposer qu'elles soient entièrement absorbées et utilisées, elles sont loin de suffire à la construction et l'entretien d'arbres de plus de 20 mètres de haut dans des conditions d'aridité aussi sévères.

Cependant, les eaux de condensation (rosée) sont une ressource non négligeable d'humidité. D'après Guillotteau (1959), l'importance de la rosée pour la végétation des zones arides a toujours été considérée comme très grande. Dans nombres de pays arides, elle représente un total plus élevé que celui des précipitations. Certaines plantes des pays arides ont un système racinaire capable d'absorber la rosée qui se produit dans les couches supérieures du sol. D'autres l'absorbent par leurs feuilles et les expériences de Duvdevani (1957) ont montré que beaucoup d'entre elles étaient capables d'exsuder par leurs racines, dans le sol, l'eau qu'elles avaient ainsi absorbée.

Pouget (1980a) a qualifié de "racines de rosée" le réseau horizontal de racines et surtout de radicelles développées juste au-dessous de la surface du sol pour bénéficier des moindres millimètres de pluie ou de rosée.

On conviendra que ce qui précède ne peut être suffisant pour pourvoir à un flux hydrique qui alimenterait une activité évapotranspirationnelle conséquente liée à une population de pistachiers de l'Atlas vigoureuse constatée sur le terrain (rappelons que l'ETP calculée dans ces régions est de 2365.57 mm/an).

*In situ*, en creusant nos profils nous avons constaté que les sols devenaient de plus en plus humides, contrastant avec la surface désolément sèche du sol. La présence d'un écoulement dans les couches profondes est plus que vraisemblable. Rappelons que le biotope échantillonné est un lit d'oued qui, bien qu'en surface il parait asséché, de l'eau continuerait à couler en ses profondeurs. La teneur en argiles et en matière organique de ces niveaux profonds augmente « *crescendo* » et confortent ainsi la capacité de rétention en eau de ces sols dans le même sens. Tous les pistachiers de l'Atlas échantillonnés (sauf le sujet BO2)

investissent dès lors le tiers de leur biomasse racinaire dans l'émission de racines profondes proportionnellement épaisses et ramifiées. La forte corrélation constatée entre le nombre de racines profondes, la circonférence moyenne des racines profondes et le taux de matière organique de ces sols expliquerait l'isohumisme constaté. En effet, d'après Drénou (2006), l'enrichissement du sol en matière organique est directement lié à l'activité racinaire. D'après Pouget (1980b), la végétation naturelle est pratiquement la seule source de matière organique (dans les milieux arides) ; synthétisée au niveau des organes aériens, elle est restituée au sol sous forme de litière ou, par la décomposition sur place du système racinaire d'où son incorporation profonde dans le profil (isohumisme).

Par ailleurs, ce type de racine a une très grande conductance hydraulique étant donné son histologie particulièrement riche et dense en larges vaisseaux de xylème (Pate et *al.*, 1995). Ajouté à cela, les racines des espèces xérophiles peuvent extraire l'eau pour des tensions de succion voisines du point de flétrissement (Oudin, 2005).

L'approche analytique a ses limites et faiblesses ; elle s'appuie sur la précision des détails et ne considère qu'une variable à la fois ; alors que l'approche systémique se concentre sur les interactions entre les éléments en s'appuyant sur une perception globale (De Rosnay, 1975).

Nous considérons dans notre cas, que l'approche systémique est à même d'apporter des éclaircissements plausibles concernant les voies d'approvisionnement en eau, en quantités suffisantes, de cette population dans de telles conditions de sécheresse.

Nous proposons deux explications complémentaires qui nous aideraient à cerner les réponses adaptatives à la problématique de l'approvisionnement hydrique de cette population de phanérophytes.

- Selon le principe de l'« hydraulic lift » (Caldwell et Richards, 1989), la nuit les individus pompent l'eau des profondeurs plus humides (niveaux réservoirs) grâce à leurs racines profondes, à très grande conductance hydraulique. Une quantité est exsudée à la surface et servira à humidifier les niveaux superficiels (et lixiviation inhérente). Cette eau sera absorbée la journée par les racines superficielles du pistachier de l'Atlas (et des autres plantes).

Cette eau par effet cumulatif, s'ajoute à celle qui a exsudé de ces mêmes racines superficielles et liée au phénomène de rosée décrit plus haut (Guillotteau, 1959). Ce qui permettra de maintenir une activité évapotranspirationnelle très intense.

Parallèlement, la réserve utile de ces sols superficiels est réapprovisionnée par ascension capillaire à partir des niveaux humides plus profonds (Oudin, 2005).

- En même temps, les individus de cette population sont interconnectés par un réseau d'anastomoses racinaires (Fig. 67) qui permettrait la redistribution des flux hydriques entre eux, s'inscrivant dans une stratégie de facilitation intra-spécifique.



Fig. 67: nombreuses anastomoses racinaires chez les pistachiers de l'Atlas de la population de Béni Ounif (Photos : Limane A., 2010).

Une partie de l'eau pompée par les racines profondes passe à travers les anastomoses et est ainsi redistribuée directement aux individus qui présenteraient un potentiel hydrique plus négatifs (étant en stress hydrique). En contrepartie, nous supposons que les pourvoyeurs en eau reçoivent des avantages intéressants qui restent à déterminer et ferait l'objet d'un thème de recherche potentiel très intéressant.

Drénou (2006) explique que quand les conditions d'alimentation en eau et en éléments minéraux sont difficiles, un individu en situation de carences peut, après soudures des racines, profiter de la plus grande absorption des individus voisins ; lors d'une sécheresse par

exemple, l'eau pourra être pompée par les arbres en bordure de rivière et être acheminée via les greffes racinaires aux sujets les plus éloignées.

Ainsi et selon une approche systémique, la stratégie de la coopération serait plus efficace qu'une stratégie de compétition coûteuse et contreproductive dans ces biotopes extrêmes. La population de pistachier de l'Atlas, en plus d'une optimisation de ses architectures racinaires, fédère les compétences génétiques des individus interconnectés qui la compose, pour augmenter les chances de leur survie et *in fine* leurs valeurs sélectives.

Dans ces biotopes la population transcende l'individu, on a à faire à une forme de « méta-individu » génétiquement plus apte à la survie dans ces conditions d'adversité.

## **Volet II : Adaptation architecturale racinaire du pistachier de l'Atlas selon un gradient d'aridité climatique et édaphique croissante : cas d'un transect nord-sud en Algérie.**

### **1. Introduction**

Les biotopes des quatre stations choisies et leurs populations respectives de pistachier de l'Atlas ont montré *a priori* des disparités climatiques, édaphiques et architecturales racinaires. Les populations qui y végètent ont réussi leurs colonisations en ayant adopté des stratégies appropriées.

En effet, considérées séparément nous constatons que les sols sous pistachiers échantillonnés à Sidi Naamane ont montré en moyenne une texture limono-argileuse, avec une forte capacité de rétention en eau (37,87% en moyenne). Le système racinaire développé par la population de pistachier de l'Atlas y est majoritairement superficiel (75% des individus). Dans la daya d'el-Mergueb, les sols sous pistachier de l'Atlas ont montré en moyenne une texture limono-sableuse avec une capacité de rétention moyenne en eau de 25,40%, la population échantillonnée a développé un système racinaire majoritairement mixte (plus de 71% des individus). La daya de Lekhneg a montré la même texture moyenne des sols sous pistachier de l'Atlas, mais une capacité de rétention en eau de 27,74% en moyenne. Les systèmes racinaires développés par la population échantillonnée sont de type mixte dans 100% des cas. Enfin, la station de Béni Ounif a des sols sous pistachier de l'Atlas en moyenne sablo- limoneux, avec une capacité de rétention moyenne en eau de 24,57%. Les systèmes racinaires exprimés par les individus échantillonnés sont à plus de 83% de type mixte.

Disposant des données de chacune de ces quatre populations (principalement climatiques, édaphiques et dendrométriques racinaires), nous avons tenté de les intégrer dans le cadre d'une approche inter-populationnelle, en continuité avec l'approche intra-populationnelle précédente, et ce en constituant une sorte de métapopulation et ainsi de tester les évolutions des différentes variables selon un gradient d'aridité croissante.

L'objectif de ce Volet II est à notre connaissance original, il ambitionne de relever les traits adaptatifs d'une métapopulation de pistachier de l'Atlas à large amplitude écologique, qui fait face inexorablement aux différents stress inhérents aux aridités climatique et édaphique croissantes des environnements qu'elle colonise.

## 2. Matériels et méthodes

Les données utilisées lors de ce volet II sont parmi celles utilisées lors du volet I. Cependant, et s'agissant des données climatiques, et en plus des données utilisées précédemment, nous avons ajouté pour les besoins de ce deuxième volet, un estimatif très pertinent proposé par Schenk et Jackson (2005). Il s'agit des quantités mensuelles d'eau en surplus (Water surplus :  $W_{sur}$ ) potentiellement disponible pour leur stockage en profondeur, et le déficit mensuel en eau (Water deficiency :  $W_{def}$ ), représentant la demande évapotranspirationnelle potentielle sur l'eau stockée en profondeur. Le calcul de ces deux variables se fait suivant les équations suivantes :

$$W_{sur} = \sum_{Mois} (P_m - ETP_m) , \text{ pour tous les mois où } P_m - ETP_m > 0$$

$$W_{def} = \sum_{Mois} (ETP_m - P_m) , \text{ pour tous les mois où } ETP_m - P_m > 0$$

[ $P_m$  = précipitations mensuelles (mm) et  $ETP_m$  = évapotranspiration mensuelle (mm)]

La métapopulation obtenue après intégration des quatre populations pose une problématique supplémentaire de légitimité des classes d'âges estimées *a posteriori*. En effet, chaque population a des spécificités dendrométriques liées aux conditions de leurs développements. Par exemple, est-ce qu'à une unité de biomasse d'un individu donné à Sidi Naamane (étage subhumide) correspondrait la même unité de biomasse pour un individu donné à Béni Ounif (étage Saharien) ? Il est évident que non. La disponibilité de l'eau à Médéa comparée à Béchar nous oblige à modérer la relativité de cette équivalence. En effet, la même unité de biomasse à Béni Ounif est plus coûteuse en termes d'énergie et de temps pour la synthétiser qu'à Sidi Naamane. Ainsi, des individus de mêmes dimensions dendrométriques appartenant à différentes populations auront vraisemblablement des âges différents. Les individus des différentes populations représenteraient dès lors des formes d'écotypes adaptés à leurs environnements respectifs. Etablir un modèle mathématique qui prenne en compte les spécificités de chaque environnement et qui permettrait d'estimer ces âges sera un sujet potentiel attendu.

Les travaux d'Ifticene-Habani et Messaoudène (2016) sur la croissance radiale et la sensibilité au climat du pistachier de l'Atlas sont, de ce point, de vue très édifiants. En effet, d'après les deux auteurs, la distinction des années caractéristiques a permis de mettre en évidence le rôle des précipitations dans la croissance radiale du pistachier de l'Atlas. Les années les plus sèches sont généralement les plus défavorables pour la croissance. En revanche, les années humides correspondent à des fortes croissances. Les fonctions de réponse montrent la prépondérance des précipitations dans le déterminisme de l'accroissement radial du pistachier de l'Atlas. Par contre, les températures n'exercent qu'un effet complémentaire.

Ce qui précède confirme notre appréhension ; les individus des stations les plus arrosées auront un fort taux de croissance radiale, et inversement pour les autres. Ainsi à de grands individus dans les biotopes humides correspondraient en termes d'âge des individus moins « épais » dans des biotopes plus arides.

Etant donné l'absence d'un coefficient de correction, nous avons adopté par défaut et pour les besoins de ce volet II, une approche similaire à celle adoptée lors du volet I, avec une précaution supplémentaire, celle de ne pas affecter d'âges relatifs à ces individus. Nous avons appliqué la méthode de Liorzou (1956) pour déterminer le nombre de classes de circonférence des troncs. Afin de ne pas confondre les symboles affectés aux classes d'âges des individus de la population de Béni Ounif avec les classes de circonférences de la « métapopulation », nous avons symbolisés les classes de cette dernière par des codes différents (Tableau 48).

La méthode suivie lors de ce volet est basée sur une approche graduelle et intégrative. Tout d'abord, nous avons testé les corrélations des variables pédologiques des quatre stations, par le moyen du test de Pearson, et nous nous sommes focalisés sur les variables les plus corrélées avec la capacité de rétention en eau des sols étant donné que cette variable, eu égard à la thématique engagée, est celle qui est primordiale dans le pourvoi en eau des individus candidats à la colonisation de ces milieux arides. Nous avons ensuite testé les tendances évolutives de ces variables selon le gradient d'aridité croissante que suivent les quatre stations échantillonnées par le biais de la méthode des moindres carrés et de leurs coefficients de corrélations ( $R^2$ ).

Quant aux variables racinaires des individus des quatre stations, nous avons testé la significativité de leurs différences en les soumettant à des tests ANOVA. Celles qui ont montré des différences significatives ont été testées pour déterminer leurs tendances selon le

gradient d'aridité croissante par le biais de la méthode des moindres carrés suivis de leurs coefficients de corrélations ( $R^2$ ).

Nous avons ensuite confondu les différents types de variables en leurs imposant le test de corrélation de Pearson et une ACP à chaque fois. Ces confrontations ont concerné : les variables climatiques *versus* les variables pédologiques et ensuite, ces mêmes variables pédologiques *versus* les variables racinaires des individus échantillonnés dans les quatre stations.

Le logiciel SatBox 7.5 est celui utilisé pour réaliser les tests de corrélations de Pearson et les ACP. Les courbes de tendances et leurs coefficients de corrélations ( $R^2$ ) ont été réalisés grâce au logiciel office Excel 2010.

### 3. Résultats

#### 3.1. Estimation des classes de circonférences des individus échantillonnés

Par le biais de la méthode de Liorzou (1956), nous avons obtenu les résultats suivants pour cette metapopulation (Tableau 48).

Tableau 48: classes des circonférences des troncs des individus échantillonnés dans les quatre populations.

$X_{i\ min}$		2.55	Codes et classes		n	Code individu
$X_{i\ max}$		374	$c_1$	[0-74[	4	ME5, ME6, LE3, LE4.
Etendue de la classe	$d$	371.45	$c_2$	[74-148[	10	SN2, SN3, SN4, SN5, ME1, ME2, ME4, ME7, LE5, LE6.
Nombre de classes	$k$	6	$c_3$	[148-222[	5	SN6, LE1, LE2, ME3, BO3.
Amplitude d'une classe	$a$	74	$c_4$	[222-296[	7	SN1, SN7, SN8, BO4, BO5, BO1, BO6.
Borne inférieure de la 1 <sup>ère</sup> classe	$Li$	0	$c_5$	[296-370[	0	/
Borne supérieure de la 1 <sup>ère</sup> classe	$Ls$	74	$c_6$	[370-444[	1	BO2
			Total		27	27

Les calculs ont abouti à 6 classes de circonférence de tronc. Nous constatons que la première classe est constituée de 4 individus appartenant exclusivement aux dayas d'el-Mergueb et de Lekhneg. La deuxième classe a le plus grand effectif (10 individus) appartenant aux trois premières stations, en sont donc exclus ceux de Béni Ounif. La

troisième classe renferme 5 individus appartenant aux quatre stations échantillonnées. De la quatrième classe sont exclus les individus des deux dayas échantillonnées et renferme 7 individus. La cinquième classe ne contient aucun individu. Enfin, la sixième et dernière classe ne contient qu'un seul individu, il appartient à la station de Béni Ounif.

### **3.2. Caractéristiques climatiques et quantité d'eau potentiellement disponible pour le stockage en profondeur**

Les données climatiques principales (P et T) (Tableau 1), ainsi que les indicateurs climatiques calculés (ETP, IA et DSS) (Tableau 4, Tableau 5, Fig. 29 et Fig. 30) montrent une nette diminution des précipitations et une nette augmentation de l'aridité et de la température selon le transect nord sud. Selon la méthode d'étagement bioclimatique d'Emberger (1955), ce transect débute avec un climat subhumide tempéré à Médéa et se termine par un climat saharien tempéré à Béchar, en passant par un climat aride tempéré à M'sila et limite aride/saharien tempéré à Laghouat. Les courbes de tendance ainsi que leurs coefficients de corrélation respectifs (Fig. 31) attestent de cette évolution.

Les résultats de l'application des formules estimatives de Schenk et Jackson (2005) (Tableau 49 et Fig. 68) montrent que Médéa est la seule station qui offre une quantité d'eau potentiellement stockable dans les profondeurs du sol.

Ce surplus d'eau ( $W_{sur}$ ) est enregistré pendant les mois de janvier/février et novembre/décembre (les mois les plus pluvieux et les plus froids). Les mois restants sont caractérisés par un déficit hydrique ( $W_{def}$ ) lié à la forte demande évapotranspirationnelle.

Avec l'augmentation de l'aridité climatique le long du transect,  $W_{sur}$  est nulle pendant toute l'année, contrairement à  $W_{def}$  qui ne cesse d'augmenter dans les trois stations restantes.

Ainsi, ces résultats confirment que le transect nord-sud choisit suit indubitablement un gradient d'aridité climatique croissante.

Tableau 49 : eau potentiellement stockable en profondeur (Wsur) et déficit hydrique (Wdef) dans les sols de chaque station.<sup>1</sup>

Mois	Médéa (1995-2004)		M'sila (1995-2004)		Hassi R'mel (1995-2001/2003-2004)		Béchar (1995-2004)	
	Wsur (mm)	Wdef (mm)	Wsur (mm)	Wdef (mm)	Wsur (mm)	Wdef (mm)	Wsur (mm)	Wdef (mm)
J	<b>57.07</b>	-57.07	-27.15	<b>27.15</b>	-49.67	<b>49.67</b>	-77.34	<b>77.34</b>
F	<b>8.65</b>	-8.65	-54.48	<b>54.48</b>	-89.21	<b>89.21</b>	-91.15	<b>91.15</b>
M	-71.89	<b>71.89</b>	-90.46	<b>90.46</b>	-139.23	<b>139.23</b>	-152	<b>152</b>
A	-71.16	<b>71.16</b>	-113.17	<b>113.17</b>	-174.65	<b>174.65</b>	-204.51	<b>204.51</b>
M	-134.96	<b>134.96</b>	-146.67	<b>146.67</b>	-251.86	<b>251.86</b>	-266.97	<b>266.97</b>
J	-207.27	<b>207.27</b>	-204.23	<b>204.23</b>	-277.38	<b>277.38</b>	-295.87	<b>295.87</b>
Jt	-226.22	<b>226.22</b>	-232.04	<b>232.04</b>	-308.76	<b>308.76</b>	-322.72	<b>322.72</b>
At	-199.77	<b>199.77</b>	-208.1	<b>208.1</b>	-285.53	<b>285.53</b>	-298.1	<b>298.1</b>
S	-137.56	<b>137.56</b>	-124.5	<b>124.5</b>	-203.92	<b>203.92</b>	-225.77	<b>225.77</b>
O	-73.22	<b>73.22</b>	-89.43	<b>89.43</b>	-142.85	<b>142.85</b>	-183.09	<b>183.09</b>
N	<b>33.64</b>	-33.64	-47.23	<b>47.23</b>	-65.23	<b>65.23</b>	-103.82	<b>103.82</b>
D	<b>52.81</b>	-52.81	-21.37	<b>21.37</b>	-47.84	<b>47.84</b>	-68.48	<b>68.48</b>
Cumuls	<b>152.17</b>	<b>1122.05</b>	-	<b>1358.83</b>	-	<b>2036.13</b>	-	<b>2289.82</b>

**Wsur** = eau en surplus potentiellement stockable en profondeur dans le sol. **Wdef** = demande potentielle évapotranspirationnelle sur l'eau stockée en profondeur dans le sol.

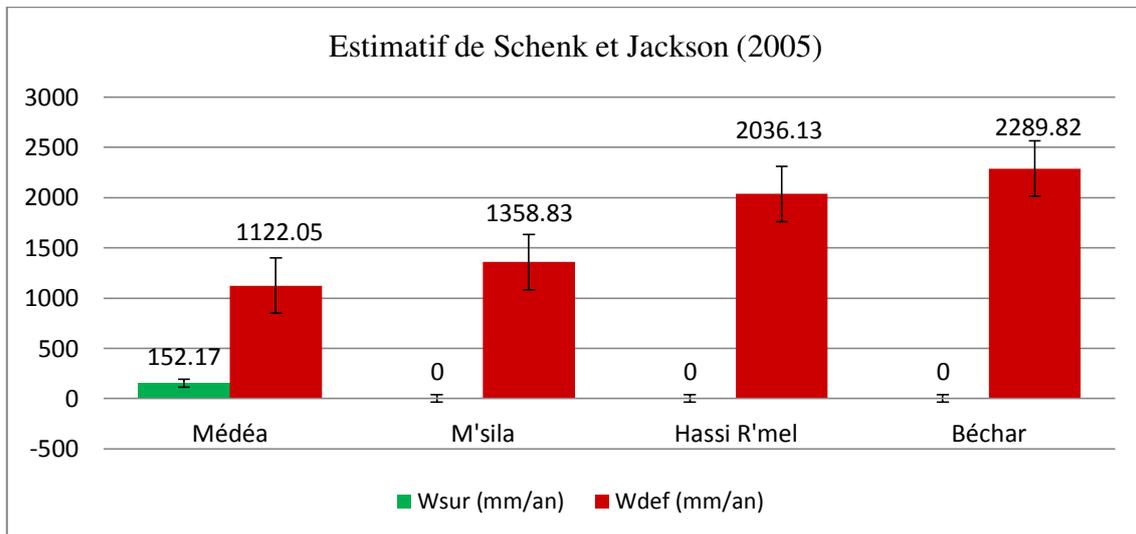


Fig. 68 : quantités d'eau potentiellement disponible en profondeur (Wsur) et déficit hydrique (Wdef) selon le transect nord-sud.

[Wsur : eau en surplus potentiellement stockable en profondeur. Wdef : demande potentielle évapotranspirationnelle sur l'eau stockée en profondeur dans le sol.]

<sup>1</sup> Ne sont considérées que les valeurs positives comme énoncé dans les formules de Schenk et Jackson (2005).

### 3.3. Sélection des variables pédologiques les plus corrélées avec la capacité de rétention en eau des sols

Pour ce faire, nous avons confronté ces variables par le biais du test de corrélation de Pearson, les résultats obtenus sont illustrés par le tableau 50.

Tableau 50 : test de corrélation confrontant les variables pédologiques des quatre stations

	CR	A	LF	LG	SF	SG	CaCO <sub>3</sub>	pH	MO
CR	1	-	-	-	-	-	-	-	-
A	<b>0.91</b>	1	-	-	-	-	-	-	-
LF	<b>0.68</b>	<b>0.51</b>	1	-	-	-	-	-	-
LG	<b>0.49</b>	0.25	<b>0.56</b>	1	-	-	-	-	-
SF	<b>-0.43</b>	-0.38	-0.23	-0.31	1	-	-	-	-
SG	<b>-0.49</b>	<b>-0.46</b>	<b>-0.45</b>	-0.24	-0.33	1	-	-	-
CaCO <sub>3</sub>	<b>0.43</b>	0.29	<b>0.62</b>	<b>0.42</b>	<b>-0.46</b>	-0.04	1	-	-
pH	<b>0.67</b>	<b>0.62</b>	0.35	<b>0.49</b>	<b>-0.63</b>	-0.09	0.24	1	-
MO	<b>0.84</b>	<b>0.76</b>	<b>0.62</b>	0.32	-0.26	-0.40	0.30	<b>0.50</b>	1
<i>En gras, valeurs significatives (hors diagonale) au seuil alpha=0.05 (test bilatéral)</i>									
A : taux d'argiles (%); LF : limons fins(%); LG : limons grossiers (%); SF : sables fins (%); SG : sables grossiers (%); CaCO <sub>3</sub> : taux de calcaire total (%); CR : capacité de rétention en eau (%); MO : taux de matière organique (%).									

Nous constatons que la capacité de rétention en eau des sols est corrélée avec toutes les variables pédologiques considérées. Cependant, les valeurs affichées par le test montrent que les significativités de ces corrélations présentent des écarts importants entre les variables. En effet, la capacité de rétention en eau est surtout positivement corrélée aux taux d'argiles, de matière organique, des limons fins et au pH des sols. Viennent ensuite les taux de limons grossiers et enfin de calcaire total. Les taux de sables (fins et grossiers) ont montré des corrélations négatives avec la capacité de rétention en eau.

### 3.4. Evolution des variables pédologiques le long du gradient d'aridité croissante

La figure 69 montre l'évolution des variables pédologiques les plus corrélées avec la capacité de rétention en eau des sols échantillonnés le long des quatre stations.

Nous constatons que selon le transect considéré (donc selon le gradient d'aridité croissante), la capacité de rétention en eau des sols échantillonnés tend à diminuer avec les mêmes tendances que le montrent les diminutions des taux d'argiles, de matière organique, de limons fins et de limons grossiers. En effet, leurs forts coefficients de corrélations le confirment.

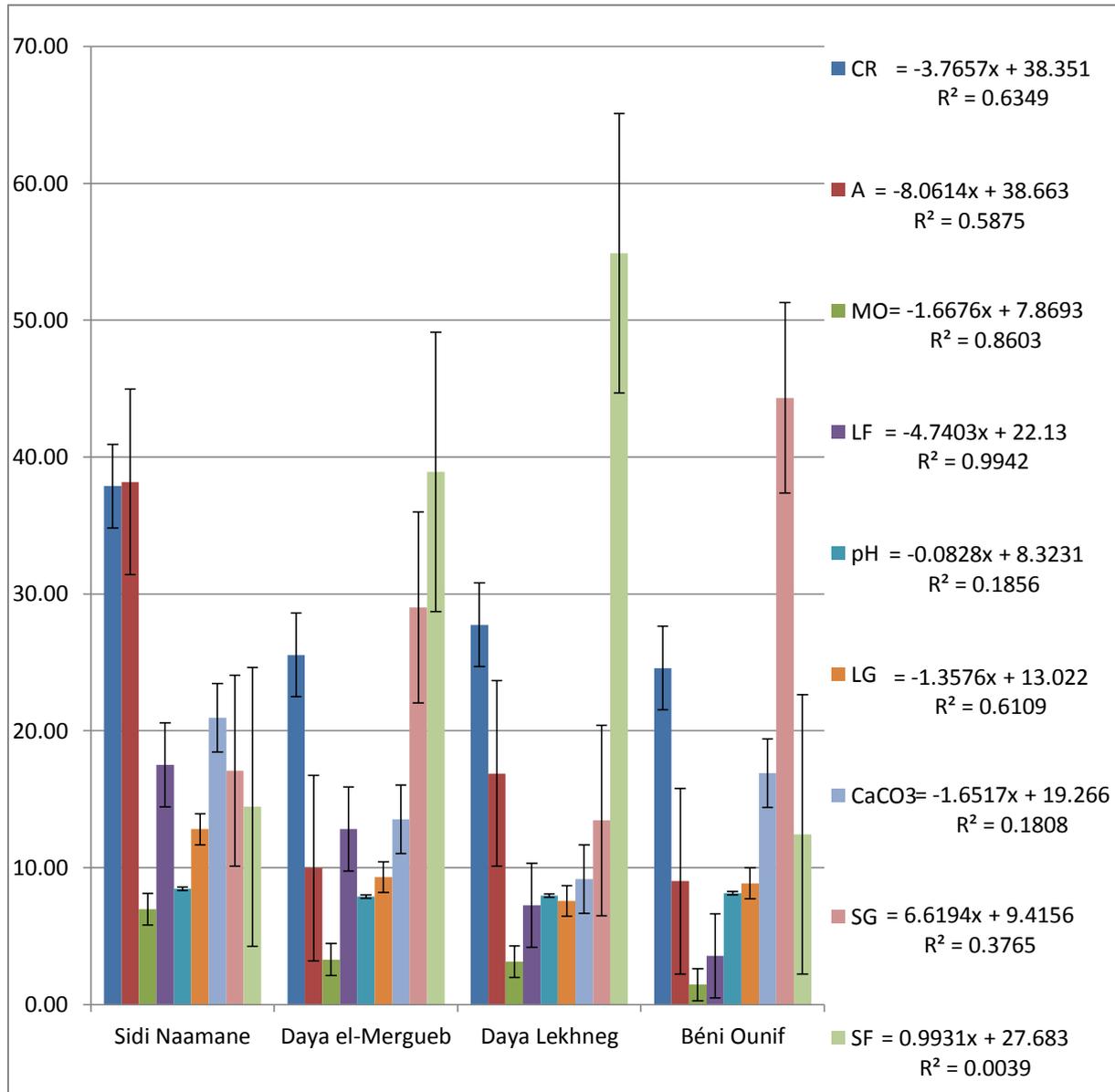


Fig. 68: Evolution des variables pédologiques le long du gradient d'aridité croissante.

[A: taux des argiles (%); LF : taux de limons fins (%); LF : taux de limons fins(%); SF: taux de sables fins (%); SG : taux des sables grossiers; CaCO<sub>3</sub> : taux de calcaire total (%); CR : capacité de rétention en eau (%); MO : taux de matière organique (%).].

Les deux variables, pH et taux de calcaire total montrent une tendance presque identique à diminuer mais avec la même faiblesse quant à leurs coefficients de corrélations ( $R^2 = 0,18$ ). Quant aux taux de sables fins, ils ne montrent pas de tendance particulière comme c'est le cas des taux de sables grossiers qui tendent à augmenter le long du gradient considéré.

### 3.5. Caractéristiques racinaires des populations échantillonnées le long du gradient

Etant donné que le nombre d'individus échantillonnés diffère d'une population à une autre (sauf pour Lekhneg et Béni Ounif), nous avons procédé le long de cette partie, à la pondération des résultats obtenus en procédant systématiquement à leur transformation en pourcentage (%). Ainsi, leur comparaison devient plus pertinente (et équitable).

L'effectif total des racines recensées s'élève à 288 (Tableau 51). Nous constatons que dans toutes les stations échantillonnées, la fréquence des racines superficielles (RS %) est toujours supérieure à celles des racines profondes (RP %) et constitue au moins et chez chaque population échantillonnée, plus de 60% de son effectif total racinaire. Ainsi, la fréquence des racines profondes ne dépasse pas les 40% du total racinaire, quel que soit la population considérée.

Tableau 51 : nombre de racines échantillonnées par station et fréquence de chaque type racinaire.

Stations	n	RS ± Δ	%	RP ± Δ	%	Total des racines ± Δ	%
Sidi Naamane	8	<b>88 ± 1.27</b>	<b>89.76</b>	<b>10 ± 0.84</b>	<b>10.2</b>	<b>98 ± 2.06</b>	100
el Mergueb	7	43 ± 0.88	72.88	16 ± 0.71	27.19	59 ± 1.08	100
Lekhneg	6	<b>37 ± 1.56</b>	<b>61.66</b>	23 ± 1.14	<b>38.33</b>	<b>60 ± 1.39</b>	100
Béni Ounif	6	47 ± 1.05	66.19	<b>24 ± 1.00</b>	33.80	71 ± 1.25	100
<i>Totaux</i>	27	<i>215 ± 0.7</i>	<i>74.65</i>	<i>73 ± 0.49</i>	<i>25.35</i>	<b>288 ± 0.68</b>	<i>100</i>

n : nombre d'individus échantillonnés ; RS : nombre de racines superficielles ; RP : nombre de racines profondes ; Δ : erreur standard.

Nous constatons que l'échantillon de la population de Sidi Naamane a présenté le nombre de racines superficielles le plus élevé comparé aux populations restantes. En effet, ce type racinaire constitue 89,76% du total racinaire de cette population. En même temps, elle a présenté le nombre de racines profondes le plus bas, avec 10,2% de son total racinaire. Le nombre de racines superficielles le plus faible est enregistré chez la population de Lekhneg avec 61,66% du total racinaire de cette population, du coup elle a présenté le nombre de racines profondes le plus élevé avec 38,33% de son total racinaire.

Le tableau 52 illustre les données détaillées des types et différentes mesures racinaires des individus échantillonnés appartenant aux quatre populations situées le long de ce transect nord-sud.

Tableau 52 : types, dimensions, caractéristiques et fréquences des racines des individus échantillonnés dans les quatre populations.

Station	n	RS ± Δ	RS (%)	LTRS ± Δ (cm)	LTRS (%)	CMRS ± Δ (cm)	CMRS (%)	RRS ± Δ	RRS (%)	RP ± Δ	RP (%)	LTRP ± Δ (cm)	LTRP (%)	CMRP ± Δ (cm)	CMRP (%)	RRP ± Δ	RRP (%)
Sidi Naamane	8	<b>88</b> ±1.27	<b>89.76</b>	12607.63 ±202.82	<b>94.89</b>	19.26 ±3.44	49.5	<b>881</b> ±33.16	<b>94.53</b>	10 ±0.84	<b>10.2</b>	679 ±55.53	<b>5.11</b>	19.65 ±3.32	50.50	51 ±5.21	<b>5.47</b>
Daya el Mergueb	7	43 ±0.89	72.88	1356.5 ±47.02	68.09	9.32 ±2.11	<b>40.31</b>	129 ±5.66	76.33	16 ±0.72	27.19	635.75 ±28.09	31.9	13.8 ±3.07	<b>59.69</b>	40 ±2.75	23.67
Daya Lekhneg	6	37 ±1.56	<b>61.66</b>	2183 ±91.17	<b>62.16</b>	17.22 ±4.88	<b>60.23</b>	219 ±10.36	64.98	23 ±1.14	<b>38.33</b>	1329 ±76.65	<b>34.84</b>	11.37 ±2.42	<b>39.77</b>	118 ±8.89	35.01
Béni Ounif	6	47 ±1.05	66.19	<b>18366</b> ±799.17	80.04	<b>29.84</b> ±4.29	56.27	225 ±12.72	<b>63.2</b>	<b>24</b> ±1	33.8	<b>4580</b> ±319.83	19.96	<b>23.19</b> ±4.08	43.73	<b>131</b> ±10.93	<b>36.78</b>
<i>Totaux</i>	27	<b>215</b> ±0.7	<b>74.65</b>	<b>34703.13</b> ±278.26	<b>82.77</b>	/	61.97	<b>1467</b> ±12.38	81.18	73 ±0.49	25.35	7223.75 ±87.85	17.23	/	38.03	340 ±3.63	18.82
<i>Moyennes</i>	6.75	53.75	/	8675.78	/	19.87	56.76	366.75	/	18.25	/	1805.94	/	17	40.67	170	/
<i>Ecart Type</i>	0.96	3.64	/	1446.95	/	10.99	/	64.36	/	2.52	/	456.8	/	9.63	/	18.85	/
<p>RS : nombre de racines superficielles ; LTRS : longueur totale des racines superficielles ; CMRS : circonférence moyenne des racines superficielles ; RRS : nombre de ramification des racines superficielles ; RP : nombre de racines profondes ; LTRP : longueur totale des racines profondes ; CMRP : circonférence moyenne des racines profondes ; RRP : nombre de ramification des racines profondes ; ± Δ : erreur standard</p>																	

Les racines superficielles chez la population de Sidi Naamane constituent l'essentiel et de sa longueur totale racinaire (LTRS% = 94,89%) et de son nombre total de ramifications racinaire (RRS% = 94,53%) comparées aux autres populations échantillonnées. Du coup, cette même population présente donc les fréquences des racines profondes (RP %), des longueurs totales des racines profondes (LTRP%) et des ramifications des racines profondes (RRP %) les plus basses de tous les échantillons considérés.

Cependant, les fréquences de leurs circonférences moyennes racinaires, que ce soit de ses racines superficielles (CMRS%) ou profondes (CMRP %), sont presque égales (49,5% et 50,5% respectivement).

La population de Lekhneg a montré la fréquence des racines profondes (RP %) la plus élevée comparée aux trois populations restantes, mais aussi la fréquence des longueurs totales des racines profondes (LTRP %) la plus élevée avec 34,84% et la fréquence des circonférences moyennes des racines superficielles (CMRS %) les plus élevées de l'échantillon. Ainsi, cette même population présente donc la fréquence des racines superficielles (RS %) et la fréquence des longueurs totales des racines superficielles (LTRS %) les plus basses parmi les quatre populations.

La population d'el Mergueb a présenté la fréquence des circonférences moyennes des racines profondes (CMRP %) la plus élevée, comparée aux trois autres populations avec 59,69%. Ainsi, elle présente donc la fréquence des circonférences moyennes des racines superficielles (CMRS %) la plus faible avec 40,31%. Quant à la population de Béni Ounif, elle montre la fréquence des ramifications des racines profondes (RRP %) la plus élevée parmi les quatre échantillons avec 36,78% et donc la fréquence des ramifications des racines superficielles (RRS %) la plus basse des quatre échantillons avec 63,2%.

### **3.5.1. Sélection des variables racinaires « statistiquement » significatives**

Rappelons que les valeurs discutées précédemment sont des fréquences (%) établies dans le but de pondérer les résultats des mesures des racines des quatre populations, vu que le nombre d'individus échantillonnés est différent d'une population à une autre (excepté celles de la daya de Lekhneg et de Béni Ounif). Dans le but d'assurer statistiquement la significativité des résultats obtenus, quant aux différences observées entre les quatre populations échantillonnées, nous avons procédé à des tests ANOVA appliqués aux valeurs brutes obtenues lors des mesures racinaires, nous avons obtenu le tableau 53.

Ces résultats ont montré des différences significatives entre les quatre populations échantillonnées quant à leurs : nombre de racines superficielles (RS), circonférences moyennes des racines superficielles (CMRS), nombre de ramification des racines superficielles (RRS), longueur totale des racines profondes (LTRP) et circonférences moyennes des racines profondes (CMRP). Par contre, les autres variables racinaires, à savoir : la longueur totale des racines superficielles (LTRS), le nombre de racines profondes (RP) et le nombre de ramifications des racines profondes (RRP), n'ont pas montré cette significativité.

Tableau 53 : résultats des tests ANOVA appliqués aux mesures brutes des caractéristiques racinaires des quatre populations.

Variabes	Résultats	Conclusions
<b>RS</b>	<b>F (3.23) = 3.91 ; p &lt;0.02</b>	<b>significatif</b>
LTRS	F (3.23) = 11.58 ; p <7.93	non significatif
<b>CMRS</b>	<b>F (3.23) = 8.03 ; p &lt;0.0007</b>	<b>Hautement significatif ***</b>
<b>RRS</b>	<b>F (3.23) = 4.03 ; p &lt;0.01</b>	<b>Très significatif **</b>
RP	F (3.23) = 2.12 ; p <0.12	non significatif
<b>LTRP</b>	<b>F (3.23) = 4.38 ; p &lt;0.01</b>	<b>Très significatif **</b>
<b>CMRP</b>	<b>F (3.23) = 3.27 ; p &lt;0.03</b>	<b>Significatif</b>
RRP	F (3.23) = 1.43 ; p <0.25	non significatif
<i>Au seuil alpha = 0.05</i>		
RS : nombre de racines superficielles ; LTRS : longueur totale des racines superficielles ; CMRS : circonférence moyenne des racines superficielles ; RRS : nombre de ramification des racines superficielles ; RP : nombre de racines profondes ; LTRP : longueur totale des racines profondes ; CMRP : circonférence moyenne des racines profondes ; RRP : nombre de ramification des racines profondes.		

### 3.5.2. Evolution selon le gradient d'aridité croissante des variables racinaires les plus significatives

Nous avons voulu déterminer le sens des évolutions des variables étudiées le long du transect nord-sud (donc selon le gradient d'aridité croissante). Nous n'avons considéré que les variables sélectionnées par l'ANOVA et ayant donc montré des différences significatives entre les quatre populations.

La figure 69 illustre l'évolution de ces variables racinaires le long de ce transect. Les écarts entre les valeurs des mesures brutes des différentes variables étant très importants, nous avons procédé à leur transformation logarithmique pour une meilleure lisibilité.

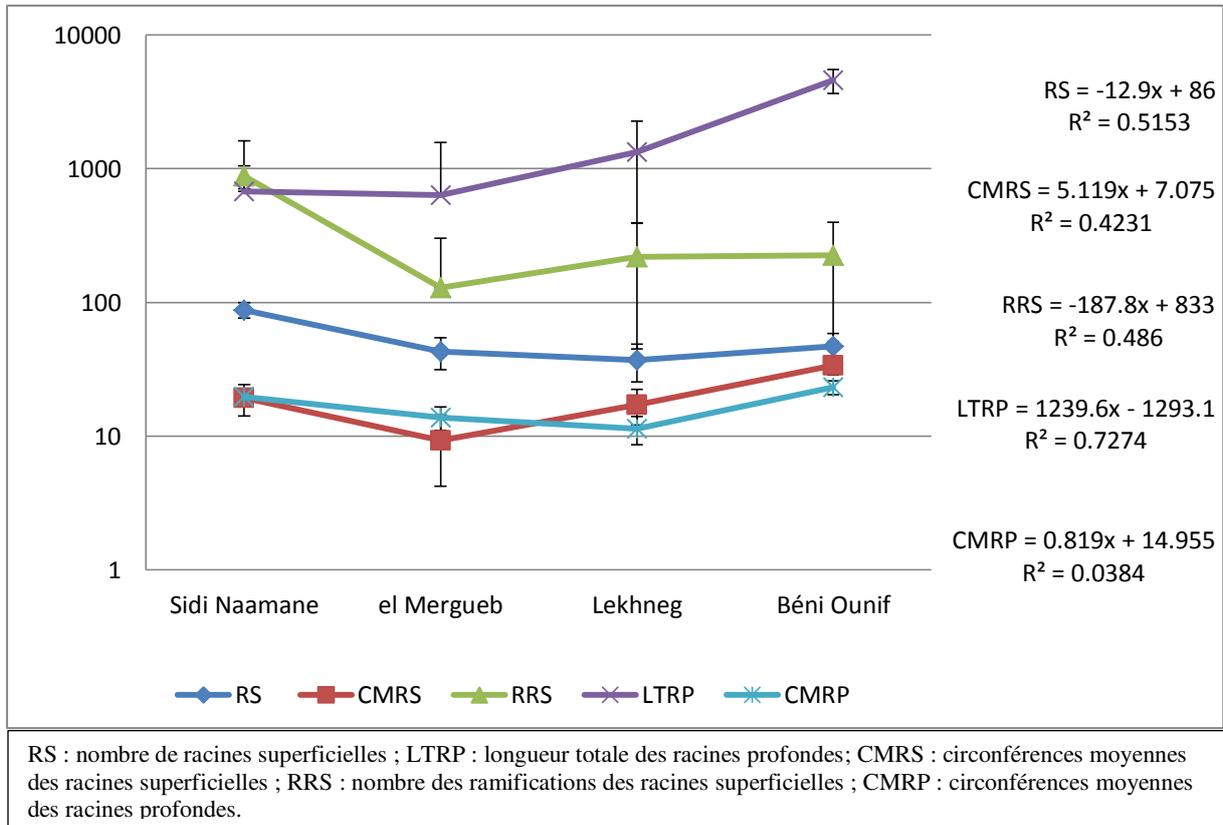


Fig. 69 : courbes des tendances et coefficients de corrélations ( $R^2$ ) des variables racinaires le long du transect nord-sud.

Nous constatons que le long du gradient d'aridité croissante, le nombre de racines superficielles (RS) et le nombre de leurs ramifications (RRS) diminuent significativement, tandis que la circonférence moyenne des racines superficielles (CMRS) et la longueur totale des racines profondes (LTRP) augmentent tout aussi significativement. Quant aux circonférences moyennes des racines profondes (CMRP) leur évolution ne montre pas de tendance significative particulière.

Donc on peut dire que selon le gradient d'aridité croissante, les individus échantillonnés diminuent leurs nombre de racines superficielles et leurs ramifications, mais augmentent les circonférences de ce type de racines. Quant aux racines profondes, les individus les allongent significativement tout en gardant leurs circonférences constantes.

### 3.6. Corrélations entre les variables climatiques et les variables pédologiques des stations échantillonnées

Les résultats du test de corrélation de Pearson confrontant les variables climatiques et celles pédologiques des quatre stations échantillonnées sont illustrés par le tableau 54.

Ces résultats montrent que la capacité de rétention en eau des sols est négativement corrélée aux températures moyennes annuelles et à la durée de la saison sèche.

Tableau 54 : résultats du test de corrélation de Pearson confrontant les variables climatiques et les variables pédologiques des quatre stations.

	P	T	ETP	IA	DSS
CR	0.95	<b>-0.96</b>	-0.07	0.93	<b>-0.97</b>
A	0.93	-0.94	-0.11	0.91	-0.95
MO	<b>0.97</b>	<b>-1.00</b>	-0.11	<b>0.97</b>	<b>-0.98</b>
LF	0.91	-0.93	-0.02	0.93	-0.90
pH	0.78	-0.68	0.36	0.75	-0.78
LG	<b>0.96</b>	-0.86	0.41	<b>0.96</b>	-0.94
CaCO <sub>3</sub>	0.73	-0.55	0.73	0.72	-0.69
SG	-0.46	0.65	0.82	-0.45	0.52
SF	-0.42	0.21	-0.88	-0.42	0.38
<i>En gras, valeurs significatives au seuil alpha =0.05 (test bilatéral)</i>					
A : taux d'argiles (%); LF : limons fins (%); LG : limons grossiers (%) SF : sables fins (%); SG : sables grossiers (%); CaCO <sub>3</sub> : taux de calcaire total (%); CR : capacité de rétention en eau(%); MO : taux de matière organique (%). P : précipitations annuelles ; T : températures moyennes annuelles ; ETP : évapotranspiration potentielle ; IA : indice d'aridité ; DSS : durée de la saison sèche.					

Le taux de matière organique le long du transect est sous l'influence positive des cumuls annuels des précipitations et de l'indice d'aridité. Mais ce taux est négativement corrélé aux moyennes des températures annuelles et à la durée de la saison sèche.

Afin de mieux visualiser les interactions de ces variables dans l'hyperespace statistique, nous avons réalisé une ACP (Fig. 70).

Les axes F1 et F2 expliquent à eux deux 93% de l'inertie constatée. Selon l'axe F1, nous pouvons y discerner deux ensembles : A et B. L'ensemble A regroupe les variables pédologiques corrélées à la capacité de rétention en eau des sols. En effet, d'une part les fractions fines du sol (argiles, limons fins et limons grossiers) ainsi que leurs teneurs en matière organique suivent de près cette variable, mais d'autre part le taux de calcaire total montre aussi le même comportement. Par ailleurs, ce dernier confirme sa corrélation positive avec le pH des sols. Du point de vue climatique, cet ensemble est inféodé aux précipitations annuelles et à l'indice d'aridité des environnements échantillonnés. La station qui semble disposer de ces conjectures est celle de Sidi Naamane.

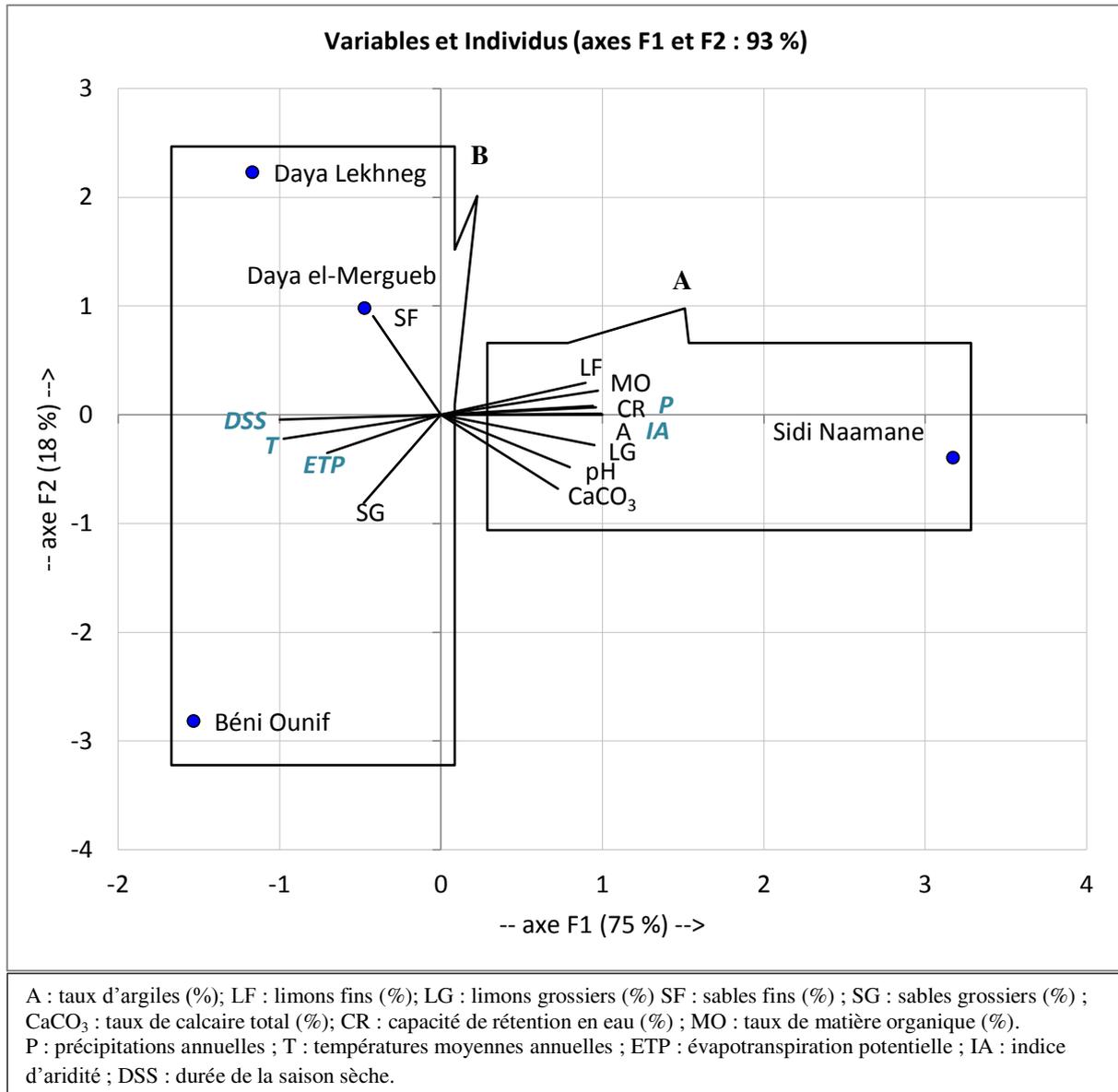


Fig. 70: ACP montrant les contributions des variables climatiques et celles pédologiques des quatre stations échantillonnées.

L'ensemble B, à l'opposé de l'ensemble A (toujours selon l'axe F1), regroupe les variables pédologiques et celles climatiques négativement corrélées à la capacité de rétention en eau des sols. En effet, les taux de sables (fins et grossiers), les moyennes annuelles des températures et la durée de la saison sèche défavorisent la capacité de rétention en eau des sols. Trois stations appartiennent à cet ensemble B et qui montrent ces conjectures. Selon l'axe F2, ces trois stations suivent un gradient dans leur aridité respective.

En effet, les dayas d'el-Mergueb puis de Lekhneg montrent une affinité pour les teneurs en sables fins contrairement à la station de Béni Ounif qui en montre pour les taux de sables grossiers. Les variables climatiques appartenant à cet ensemble penchent plutôt vers la station la plus méridionale du transect. En effet, les températures moyennes annuelles, la durée de saison sèche et l'évapotranspiration potentielle sont les plus importantes à Béni Ounif.

### 3.7. Corrélations entre les variables pédologiques et les variables racinaires des individus échantillonnés dans les quatre populations

Les résultats du test de corrélation de Pearson confrontant les variables pédologiques à celles racinaires sont consignés dans le tableau 55.

Tableau 55 : corrélation entre les variables pédologiques et celles racinaires des quatre stations échantillonnées.

	RS	LTRS	CMRS	RRS	RP	LTRP	CMRP	RRP
CR	<b>0.61</b>	0.02	0.08	<b>0.61</b>	-0.27	-0.30	-0.38	-0.21
A	<b>0.54</b>	0.04	0.03	<b>0.57</b>	-0.37	-0.32	<b>-0.44</b>	-0.22
MO	<b>0.54</b>	-0.06	-0.13	<b>0.58</b>	<b>-0.48</b>	<b>-0.43</b>	<b>-0.63</b>	-0.31
LF	<b>0.42</b>	-0.26	-0.19	<b>0.45</b>	-0.24	<b>-0.39</b>	-0.33	-0.21
pH	<b>0.44</b>	0.30	<b>0.50</b>	0.30	0.00	0.00	-0.07	0.05
LG	0.30	0.07	0.32	0.13	0.13	0.09	0.14	0.01
CaCO <sub>3</sub>	0.37	0.13	0.24	<b>0.40</b>	0.11	0.03	0.06	0.03
SG	-0.18	0.24	0.37	-0.27	-0.02	0.07	0.13	-0.04
SF	<b>-0.54</b>	<b>-0.64</b>	<b>-0.51</b>	-0.36	0.16	-0.22	-0.03	0.01
<i>En gras, valeurs significatives au seuil alpha=0.05 (test bilatéral)</i>								
A : taux d'argiles (%); LF : limons fins (%); LG : limons grossiers (%); SF : sables fins (%); SG : sables grossiers (%); CaCO <sub>3</sub> : taux de calcaire total (%); CR : capacité de rétention en eau(%); MO : taux de matière organique (%). RS : nombre de racines superficielles ; LTRS : longueur totale des racines superficielles ; CMRS : circonférence moyenne des racines superficielles ; RRS : nombre de ramification des racines superficielles ; RP : nombre de racines profondes ; LTRP : longueur totale des racines profondes ; CMRP : circonférence moyenne des racines profondes ; RRP : nombre de ramification des racines profondes.								

Ces résultats montrent que le nombre de racines superficielles est positivement corrélé à la capacité de rétention en eau des sols, à leur taux d'argiles, de matière organique et de limons fins, mais aussi à leur pH. Par contre, le nombre de ces racines superficielles est négativement corrélé aux taux de sables fins. Le nombre de ramifications de ces racines superficielles montre des corrélations similaires à celle obtenues avec le nombre de racines superficielles, à la différence qu'il ne montre pas de corrélation significative avec le pH des sols, mais avec le taux de calcaire total. Toutefois, sa corrélation négative avec le taux des sables fins n'est pas significative comme l'a montré le nombre de racines superficielles. La longueur totale des racines superficielles est négativement corrélée aux taux de sables fins

comme le montre aussi leur circonférence moyenne racinaire, mais ces derniers montrent une corrélation positive avec le pH des sols.

Quant au nombre de racines profondes, nous constatons une corrélation négative avec le taux de matière organique, comme c'est le cas d'ailleurs de leur longueur totale et de leur circonférence moyenne, mais cette dernière variable est négativement corrélée aux taux d'argiles de ces sols.

Afin de mieux saisir les interactions entre les différentes variables et la contribution des individus dans l'hyperespace statistique, nous avons procédé à une ACP (Fig. 71).

Les résultats de l'ACP montrent que les deux axes F1 et F2 expliquent 57% de l'inertie constatée.

Selon l'axe F1, la distribution des individus échantillonnés est majoritairement concordante au gradient d'aridité croissante. En effet, les trois ensembles (A, B et C) suivent ce gradient. L'ensemble A renferme tous les individus échantillonnés à Sidi Naamane et l'ensemble C, tous les individus échantillonnés à Béni Ounif. Ces deux stations occupent respectivement les deux extrêmes du gradient climatique considéré (à savoir, subhumide tempéré et saharien tempéré). L'ensemble B occupe la partie transitoire entre les deux ensembles précédents. Cet ensemble renferme tous les individus de la daya d'el Mergueb et tous les individus de la daya de Lekhneg, à l'exception du sujet LE1 qui a montré une affinité pour l'ensemble C.

Nous constatons que ces affinités sont liées aux conditions spécifiques à chaque station. Les conditions climatiques et par extension édaphiques qui prévalent dans chacune d'elle façonnent les architectures racinaires des individus tout aussi spécifiquement.

Ainsi, dans la station de Sidi Naamane les conditions édaphiques sont caractérisées par une granulométrie fine (argiles, limons fins et même limons grossiers), riche en matière organique et en calcaire total (d'où des pH élevés), ce qui a créé des conditions favorables à une capacité de rétention en eau élevée de ces sols. Le nombre de racines superficielles de cette population augmente, ainsi que le nombre de ramifications de ce type de racines. Ce comportement semble fédérer tous les individus de cette station quelque soit leurs sexes et leurs classes de circonférences de tronc (âges relatifs).

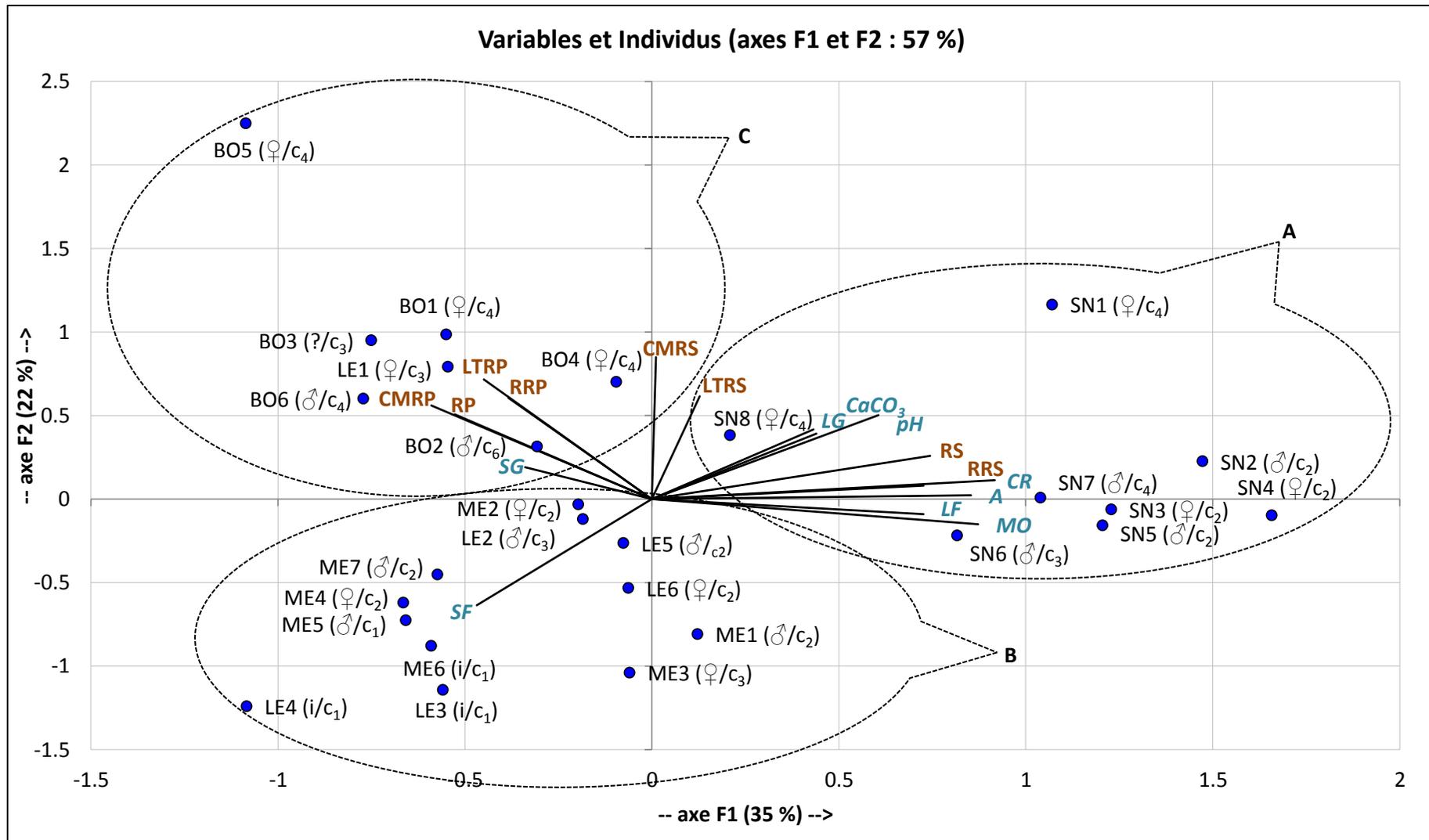


Fig. 71: ACP montrant les contributions des variables pédologiques et racinaires des individus des quatre populations de pistachier de l'Atlas.

[SNn : individu n de la population de sidi Naamane ; MEN : individu n de la daya d'el-Mergueb ; LEN : individu n de la daya de Lekhneg ; BON : individu n de la population de Béni Ounif.  $c_n$  : classe n de circonférence de tronc.]

A l'opposé, la station de Béni Ounif (ensemble C) se caractérise par des conditions climatiques et édaphiques extrêmes. Les sols y sont riches en sables grossiers, les individus quelque soient leurs sexes et classe de circonférence de tronc (âge relatifs) s'accordent à augmenter le nombre de leurs racines profondes, le nombre de ramifications de leurs racines profondes, les longueurs totales et les circonférences moyennes de ce même type de racines. Le sujet LE1 ayant montré le même comportement s'est retrouvé dans cet ensemble B.

Entre les deux stations précédentes s'agrègent les individus échantillonnés exclusivement dans les dayas pour constituer l'ensemble B. Leurs biotopes offrent des conditions intermédiaires, avec une richesse en sables fins. Quelque soient leurs sexes et leurs classes de circonférence de tronc (âge relatif), ses individus adoptent des comportements similaires. En effet, ils investissent majoritairement dans les deux types de racines et leurs caractéristiques respectives.

#### **4. Discussion**

Les résultats obtenus confirment que le transect nord-sud choisi suit indubitablement un gradient d'aridité pluviothermique et édaphique croissante. La station de Sidi Naamane, la plus septentrionale du transect, est la plus arrosée. Elle présente la durée de saison sèche la moins longue. Les conditions climatiques sont dès lors favorables à une évolution des sols vers des textures fines et riches en matière organique. Leurs capacités de rétention sont par conséquent les plus importantes du transect. Vers le sud, les précipitations diminuent drastiquement, alors que les températures et l'ETP augmentent et les durées des saisons sèches s'allongent. Les sols s'en trouvent ralentis dans leur évolution présentant des textures de plus en plus grossières, riches en sables et pauvres en matière organique ; ce qui confère à ces sols des capacités de rétention de plus en plus faibles.

En effet, pendant la période sèche très longue que ces sols supportent, ils sont pratiquement arrêtés dans leur évolution aussi bien minérale qu'organique ; ils restent ainsi relativement jeunes (Aubert, 1960). D'après Rognon (1994), dans les régions plus arides où l'évaporation prédomine sur l'ensemble de l'année, la sécheresse limite de plus en plus la formation des sols, réduits à l'extrême à des lithosols ou à des sols salins qui sont à peine des sols au sens classique du terme. D'après Pouget (1980b), la teneur en matière organique diminue régulièrement avec l'aridité croissante du climat.

Tout le long du transect, les individus échantillonnés investissent plus de 60% de leurs racines dans les niveaux superficiels des sols (0-50 cm). En effet, pour Canadell *et al.* (1996), beaucoup d'études concluent que la majeure partie de la biomasse racinaire se situe dans les 50 premiers cm du sol. Dobson et Moffat (1995) l'y ont estimé entre 60 à 90%. Gwenzi *et al.* (2011) ont trouvé que dans les écosystèmes aux ressources hydriques limitées, 90% de la densité de la biomasse racinaire se situe dans les 40 premiers centimètres du sol.

Fondamentalement, le système racinaire superficiel est généralement favorisé par rapport au système profond (Schenk et Jackson, 2002b) parce que (i) les coûts énergétiques pour leur construction et maintenance sont bas (Adiku *et al.*, 2000) ; (ii) les niveaux superficiels du sol sont généralement peu enclin au déficit en oxygène (Hillel, 1998 ; Schenk et Jackson, 2002a) ; et (iii) la concentration en nutriments y est souvent plus grande (Jobbàgy et Jackson, 2001 ; Raimbault, 2003). Mais ces niveaux, bien qu'ils se réchauffent rapidement au printemps, sont trop chauds et secs en été et se refroidissent rapidement en automne (Raimbault, 2003). Les hautes températures peuvent entraîner une diminution de l'abondance racinaire dans les niveaux superficiels (Jackson *et al.*, 1996), ce qui expliquerait la diminution significative du nombre de racines superficielles chez le pistachier de l'Atlas le long du transect. Dans ces sols particuliers, le nombre des racines superficielles devient positivement influencé par les taux de limons, qui sont dans ces sols arides la fraction fine principale à la place des argiles qui peinent à se former dans ces conditions de xéricité.

Au fur et mesure de l'accroissement des gradients climatique et édaphique, la texture du sol devient de plus en plus grossière, la capacité de rétention en eau de plus en plus faible entraînant une infiltration profonde de l'eau (Schenk and Jackson, 2005), le système racinaire du pistachier se réorganise alors, en augmentant significativement la longueur de ses racines profondes et leurs circonférences pour atteindre ces niveaux profonds.

Bien que le nombre de racines profondes soit minoritaire par rapport à l'effectif total racinaire, il n'empêche qu'elles jouent un rôle crucial dans l'approvisionnement de la plante en eau durant les saisons sèches (Gregory *et al.*, 1978 ; Stone and Kalisz, 1991). Chez quelques espèces arbustives et arborées de l'ouest Australien, à climat type-méditerranéen, la conductivité hydraulique des racines profondes est substantiellement plus grande que celle des racines superficielles, principalement due au très larges vaisseaux de xylème (1,5 à 2 mm) pour les premières (Pate *et al.*, 1995). Elles montrent souvent des sections d'une grande densité de vaisseaux par unité de surface, indiquant que leur fonction majeure est le transport

d'eau (Higgins et *al.*, 1987 ; Pate et *al.*, 1995). Ce pourcentage en eau est suffisant pour maintenir l'ouverture des stomates et traverser toute la durée de la saison sèche (Canadell et *al.*, 1996).

L'importance écologique de ces racines profondes pour le flux d'eau dans les écosystèmes soumis à d'intenses conditions d'évaporation, a été démontrée par le mécanisme d'« hydraulic lift » (ascenseur hydraulique), trouvé chez de nombreuses espèces (Richards and Caldwell, 1987 ; Caldwell and Richards, 1989 ; Dawson, 1993). Durant la nuit, ces racines absorbent l'eau des niveaux profonds du sol ; celle-ci est ensuite libérée dans les niveaux superficiels. L'eau est réabsorbée le lendemain par les mêmes plantes (à travers leurs racines superficielles) et les racines superficielles des plantes voisines qui n'ont pas accès aux eaux des niveaux profonds. Ce mécanisme est d'une importance écologique significative, car il permet aux plantes de maintenir une intense transpiration durant les périodes sèches (Canadell et *al.*, 1996).

Les racines superficielles et celles profondes du pistachier de l'Atlas s'épaississent significativement le long du transect. Selon Hodge et *al.*, (2009), l'épaississement des racines augmenterait de 100 à 1000 fois leur conductivité axiale, par rapport aux tissus sans formations secondaires.

Selon les estimatifs de Schenk et Jackson (2005), la station de Sidi Naamane est théoriquement la seule à offrir des réserves en eau potentiellement stockable en profondeur, que le pistachier de l'Atlas pourrait exploiter avec ses racines profondes. Sinon, le transect est majoritairement en déficit hydrique toute l'année. Malgré cela, et tout au long de ce transect, le pistachier de l'Atlas augmente significativement la longueur de ses racines profondes et leur épaisseur ainsi que l'épaisseur de ses racines superficielles et s'épanouit aux plus fortes périodes chaudes et sèches de l'année. Cela veut dire forcément qu'il y a trouvé une source d'humidité suffisante.

En fait, sa « foraging strategy » pour l'eau, est basée essentiellement sur le choix des biotopes les plus avantageux pour son approvisionnement hydrique dans ces milieux arides. Il s'installe en effet dans les dayas et/ou dans les *oueds*.

Rappelons que les dayas sont des dépressions alluvionnaires fermées de l'ordre métrique à kilométrique, où s'accumulent les eaux de ruissellement ; les eaux se maintiennent quelques jours ou quelques semaines; une partie s'évapore, une autre partie s'infiltré très lentement à travers un sol de texture moyenne à très fine (Pouget, 1980a). Ces bas fonds avec leurs pentes

même peu raides, reçoivent grâce aux flux de ruissellement, des quantités d'eau supérieures à celles attendues sous le régime de précipitations (Cortina et *al.*, 2012). C'est le cas de la daya d'el Mergueb (M'sila) et la daya de Lekhneg (Laghouat) (Fig.72).



Fig. 72 : pistachier de l'Atlas dans la daya de Lekhneg temporairement « noyée »  
(Avril 2011) (Photo : Limane).

Par ailleurs, et dans le cadre d'une approche plus systémique, la facilitation interspécifique est une approche à valoriser surtout dans ces biotopes extrêmes. En effet, dans ces biotopes arides, les jeunes pistachiers de l'Atlas sont presque indissociables de leur plante nurse, le jujubier (*Ziziphus lotus*). Cette espèce buissonnante très épineuse forme les buttes classiques appelées « nebkhas » (buttes plantées). Selon Pouget (1980a), de telles buttes grossièrement circulaires peuvent atteindre deux mètres de haut et plusieurs mètres de diamètre (Fig. 73). Le sable, piégé dans le massif de jujubiers s'accumule peu à peu ; il se crée un véritable biotope qui évolue différemment, sinon indépendamment du milieu environnant.



Fig. 73: Nebkhas à *Ziziphus lotus* et jeune pistachier de l'Atlas (flèche) dans la daya de Lekhneg (Avril 2011). (Photo : Limane).

Selon Laamouri et *al.* (2008) le système racinaire de *Ziziphus lotus* est adapté aux conditions d'aridité ; en effet, il présente une capacité d'occupation du sol en profondeur avant même la formation d'une biomasse aérienne. Chez les jeunes sujets, la racine principale (pivot séminale) se développe en profondeur (jusqu'à plus de 1,30 m) ; ce pivot émet des ramifications secondaires qui augmentent le volume du sol exploité. Les caractéristiques souterraines de la plante nurse permettent aux jeunes pistachiers de l'Atlas d'installer un édifice racinaire en fonction des touffes autour du pied, qui ensuite influencent l'extension latérale et le nombre de racines superficielles et profondes de différents ordres.

Par ailleurs, la partie aérienne du jujubier atténue les effets du rayonnement direct sur les jeunes pistachiers de l'Atlas et leur procure une litière indispensable aux processus pédogénétiques aboutissant à des sols hospitaliers, pour le moins dans ces milieux arides.

D'après Pouget (1980b), les racines du pistachier de l'Atlas sont très vigoureuses et « agressives », ce qui lui permet de s'immiscer dans les fissures des dalles calcaires, de dégager des espaces interfeuilletés et d'atteindre ainsi les niveaux humides les plus profonds. Les niveaux décrits précédemment constituent des réservoirs d'humidités, à l'abri de

l'évaporation. Les niveaux superficiels protègent par leurs faibles conductances thermiques ces humidités en profondeur qui constituent ainsi des pourvoyeurs en eau du pistachier de l'Atlas pendant les mois les plus secs de l'année.

Les travaux de Boubrima (2014) et ceux de Hamitouche (2016) ont abouti aux mêmes conclusions. Dans les dayas échantillonnées, les pistachiers de l'Atlas adultes ont installé des systèmes racinaires mixtes (racines superficielles et racines profondes). Ces architectures racinaires sont façonnées principalement par les conditions physico-chimiques des sols que les jeunes pistachiers de l'Atlas colonisent.

Quant à la station de Béni Ounif, sa topographie décrit un lit d'oued à régime saisonnier (Fig. 74). Lors de la réalisation des fosses pédologiques, les sols profonds bien qu'à texture majoritairement grossière étaient très humides. Un écoulement souterrain n'est pas à écarter même pendant les saisons les plus sèches. La courbe de variation de la température du sol s'amortissant assez rapidement avec la profondeur en raison de la mauvaise conductibilité thermique du sol (Pouget, 1980a), les eaux des horizons profonds des *oueds* sont ainsi gardées à l'abri de l'évaporation et exploitées par les racines profondes du pistachier de l'Atlas. Cet enracinement profond permet en même temps à ce phanérophyte d'augmenter son ancrage dans ces sols plutôt meubles et sujet à des vents très violents.



Fig. 74: Lit d'oued à Béni Ounif et un pistachier de l'Atlas déraciné (mais toujours vivant !)  
(Mars 2010). (Photo : Limane).

Selon une approche systémique, la facilitation intra-spécifique est à considérer comme facteur clé dans l'adaptation de la population à ces conditions d'indigence en eau. En effet, les individus de la population de Béni Ounif ont montré des connexions par voies d'anastomoses racinaires, qui pourraient asseoir cette hypothèse. Les individus qui ont le plus accès aux ressources hydriques, suppléeraient ceux qui en sont le moins. Le passage du flux se faisant par le réseau d'anastomoses. Ainsi, dans ces environnements extrêmes, la solidarité intra-populationnelle est la stratégie garante de la survie des individus.

Les orientations des systèmes racinaires des individus échantillonnés ne dépendent vraisemblablement ni de leurs sexes ni de leurs âges, mais des conditions pédoclimatiques des milieux à coloniser. Selon Nicoll et *al.* (1997), les ressources hydrominérales sont naturellement distribuées d'une manière hétérogène dans le volume de sol et ne cessent de changer dans le temps. Le système racinaire dans les environnements édaphiques hétérogènes tend à développer des architectures localisées et spécifiques. Ainsi, l'analyse de la distribution spatiale du système racinaire peut être utilisée pour révéler la source des éléments hydrominéraux (Lynch, 1995). En effet, le système racinaire du pistachier de l'Atlas suit les combinaisons pédologiques les plus pourvoyeuses en eau et aux rapports coûts/bénéfices les plus avantageux. Ainsi, ce sont plutôt les facteurs épigénétiques qui façonnent l'architecture racinaire du pistachier de l'Atlas en croissance.

Dans les sols à textures fines et riches en matière organique la capacité de rétention en eau étant très importante, le système racinaire est orienté vers l'expression d'un réseau superficiel avantageux du point de vue coûts/bénéfices. Tant que ces conditions perdurent, le pistachier de l'Atlas optera toujours à le maintenir et l'entretenir, quel que soit son sexe et son âge. Toutefois, on peut constater quelques racines profondes nécessaires surtout à l'ancrage de ces immenses phanérophytes.

Aux variations des conditions édaphiques (le long d'un gradient comme c'est le cas), le pistachier de l'Atlas s'adapte en réorganisant son système racinaire et l'oriente vers l'expression d'une architecture qui optimise l'acquisition des ressources. Cette redistribution a naturellement un coût. Les racines profondes sont, de par les défis auxquels elles feront face, énergivores. En effet, contrairement aux niveaux superficiels, les niveaux profonds à coloniser sont le plus souvent oxygène-déficients et à très grande impédance. C'est dire que l'allocation énergétique pour l'émission de racines profondes est une option à prendre avec parcimonie pour les racines du pistachier de l'Atlas.

La diminution du nombre de racines superficielles et du nombre de leurs ramifications, est accompagnée par, d'une part un épaississement des racines superficielles, et d'autre part un allongement des racines profondes et leur épaississement. Ce comportement « autarcique » démontre une économie dans la gestion énergétique du système racinaire du pistachier de l'Atlas. En effet, le carbone est réalloué aux organes les plus efficaces dans cette lutte pour la survie.

Selon Darwin (1880), il n'est guère exagéré de dire que l'apex radicaire est doté de sensibilité et a le pouvoir de diriger les mouvements des parties adjacentes ; il agit comme le cerveau d'un des animaux inférieurs ; ce cerveau étant situé dans l'extrémité antérieure du corps, recevant les impressions des organes sensoriels et dirigeant les divers mouvements.

Ceci est l'essentiel de son hypothèse appelée « Brain root theory » (théorie des racines cerveaux). Il faut dire qu'au vu des résultats obtenus lors de cette étude, on est tenté de l'appliquer au système racinaire du pistachier de l'Atlas. En effet, il agirait comme un cerveau sensible aux variations de son environnement et réagissant en conséquence. Il réoriente l'organogénèse vers l'expression d'une architecture racinaire optimisant l'acquisition des ressources au meilleur rapport coût/bénéfice.

## Chapitre IV

Inventaire des champignons arbusculaires et endophytes racinaires associés au pistachier de l'Atlas le long d'un gradient d'aridité croissante en Algérie.

Chapitre IV : Inventaire des champignons arbusculaires et endophytes racinaires associés au pistachier de l'Atlas le long d'un gradient d'aridité croissante en Algérie.

## Valorisation de ce travail

Ce chapitre a fait l'objet d'une publication dans un proceeding et de deux posters :

### Publication internationale dans la revue « Option méditerranée 2016 » :

*Options Méditerranéennes, A, no. 119, 2016 –  
XVI GREMPA Meeting on Almonds and Pistachios*

***Pistacia atlantica*, a spontaneous hypermycotrophic  
phanerophyte: could be a natural tool to enhance  
the potential of mycorrhizal infectivity (PMI)  
of soils in arid regions?**

**A. Limane and N. Smail-Saadoun**

Laboratoire Ressources Naturelles, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 15000 (Algeria)  
e-mail: kareem1790@gmail.com

---

**Abstract.** In our drylands, spontaneous perennials species should be used to play the role of facilitator species in the success of plurispecific agro-ecosystems. It's the case of Atlas pistachio (the main spontaneous phanerophyte in Algerian pastoral steppe). The mycorrhizal status of this species could potentially increase the potential of mycorrhizal infectivity (PMI) of soils in drylands and benefit these poor soils by its rhizospheric effect. In Algeria, we have chosen for this study, two populations of *Pistacia atlantica*. The first one is located in semi-arid region (province of Médéa) and the other in hyper arid region (province of Béchar). We found that all the roots of the studied samples were infected by Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF). Identification of their spores showed that Atlas pistachio is a hypermycotrophic species. At least we found 5 different species of Glomeromycetes in the first population (Médéa) and 3 different species in the second one (Béchar). It may be a reservoir of AMF propagules which will potentially infect cultivated species and thus will enhance their yields.

**Key words.** Arid soils – PMI – *Pistacia atlantica* – Rhizospheric effect – AMF – Glomeromycetes – Propagules – Algeria.

**Le premier poster :** lors du congrès international sur les mycorhizes (Octobre 2014, Marrakech, Maroc) :



**PARTICIPATION CERTIFICATE**

The ICM organizing committee attests that the poster entitled: «Mycorrhizas and endophytes fungi of Atlas pistachio according to an increasing climatic and edaphic gradient in Algeria» **LIMANE Abdelkrim, SMAIL-SAADOUN Noria**, has been presented at the International Congress on Mycorrhizae held from 15 to 17 October 2014 in Marrakesh, Morocco.

Marrakesh, 30 October, 2014  
ICM Organizing committee



Chapitre IV : Inventaire des champignons arbusculaires et endophytes racinaires associés au pistachier de l'Atlas le long d'un gradient d'aridité croissante en Algérie.

**Le deuxième poster :** lors de la 1<sup>ème</sup> conférence sur l'écologie microbienne (Décembre 2015, Sétif, Algérie).



## 1. Introduction

La sélection « Darwinienne » ayant comme leitmotiv « *struggle for life*<sup>1</sup> », a réduit les relations entre êtres vivants inévitablement à des relations à connotations « négatives », de limitations et contraintes par la « sélection naturelle ». Cependant, des interactions à connotations positives existent, dont la facilitation. Elles font l'objet depuis plusieurs décennies d'un intérêt important des écologues, notamment dans les environnements contraignants (Bruno et *al.*, 2003).

Certes, la flexibilité adaptative du système racinaire n'est évidemment pas à elle seule suffisante pour l'optimisation de l'acquisition des ressources hydrominérales, surtout dans ces milieux stressants, où la compétition pour les ressources est vraisemblablement impitoyable. Les relations de facilitation avec différents organismes permettent d'augmenter leurs valeurs sélectives mutuelles et à moindre coûts énergétiques.

Parmi la pléthore de microorganismes telluriques, les champignons occupent des positions stratégiques dans les chaînes trophiques, s'inscrivant dans un continuum relationnel allant du neutralisme (champignons saprophytes) au parasitisme, en passant par la symbiose la plus spécifique. En effet, les champignons mycorhiziens sont parmi les microorganismes mutualistes majeurs qui boostent l'acquisition des nutriments, la croissance du végétal et sa survie même dans les régions arides et semi-arides (Taniguchi et *al.*, 2012). La présence de ces relations symbiotiques entre racines et champignons ont été décrites depuis les années 1800, et il est maintenant clair que ces associations sont les systèmes symbiotiques les plus répandues sur terre (Paterson et *al.*, 2004).

Concomitamment aux champignons mycorhiziens, les champignons endophytiques montrent un intérêt grandissant. Leur étude est récente, à tel point que leurs identités et leurs hôtes préférés restent largement inconnus (Jumpponen et Trappe, 1998 ; Kernaghan and Patriquin, 2011), mais leurs bénéfices pour les plantes hôtes se confirment d'étude en étude. En effet, il a été démontré qu'ils peuvent former des relations mutualistes avec beaucoup d'espèces végétales (Peterson et *al.*, 2004).

Ainsi, et en phase avec notre thématique, les symbioses racinaires du pistachier de l'Atlas s'imposent *de facto* et ont été l'objet de cette partie. Elle est en continuité (et en complémentarité) avec les travaux antérieurs des équipes du laboratoire « Ressources

---

<sup>1</sup> « Lutte pour la survie »

Naturelles » de l'université Mouloud Mammeri, notamment ceux de Mechiah (2015) et les précédents travaux d'ingénierats. En effet, cette partie constitue un inventaire des champignons mycorhiziens et endophytiques associés aux racines du pistachier de l'Atlas selon le gradient d'aridité climatique et édaphique croissant, considéré lors de ces travaux. Cette approche est à notre connaissance originale.

## **2. Synthèse bibliographique**

### **2.1. Racine primaire**

La zone tégumentaire de la racine est constituée de rhizoderme ou bien, en remplacement, d'exoderme. La zone corticale, très étendue, est composée d'un tissu parenchymateux et d'endoderme ; le cylindre central comprend une ou plusieurs strates parenchymateuses (péricycle) et un seul faisceau de type radial formé d'arches du xylème et du phloème. Comme le faisceau est unique, les rayons médullaires sont absents. La partie médullaire peut être absente ou non (Fig.75).

### **2.2. Champignons mycorhiziens :**

#### **2.2.1. Caractères généraux**

Les mycorhizes ont été découvertes depuis le début du 19<sup>ème</sup> siècle (grâce aux travaux de Giuseppe Gibelli (1879, 1882 et 1883), et il est maintenant clair que ces associations sont les systèmes symbiotiques les plus répandues sur terre (Peterson et *al.*, 2004). Les partenaires dans cette association sont les membres du règne fongique et la plupart des plantes vasculaires (Harley et Smith, 1983 ; Kendrick, 1985 ; Brundrett and Abbott, 1991).

Les mycorhizes à arbuscules (Vesicular-Arbuscular Mycorrhizas : VAM) (Fig. 76) forment des associations symbiotiques avec 85% des plantes terrestres (Dickson, 2004). Les champignons impliqués appartiennent tous au phylum des Gloméromycota (Oehl et *al.*, 2011). Ils existent depuis la colonisation des continents par les végétaux au Silurien, il y a environ 450 millions d'années (Selosse et le Tacon, 1998). Cela suggère que les plantes vasculaires et les champignons VAM aient coévolué, et que les Gloméromycota aient influencé la capacité des plantes à coloniser le milieu terrestre (Schwarzott et *al.*, 2001).

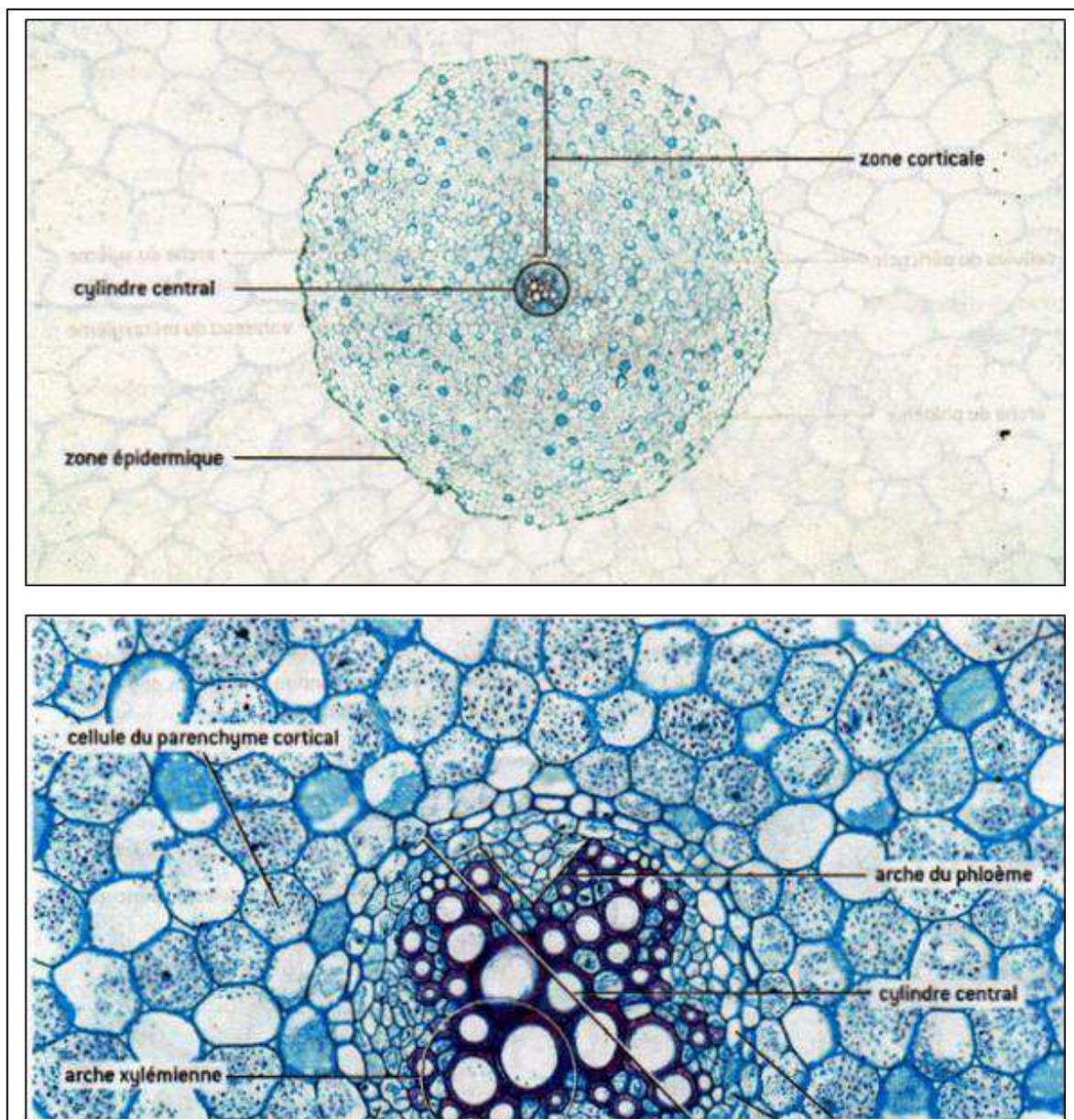


Fig.75 : coupes transversales d'une racine primaire d'Eudicot ( $\times 25$  et  $\times 200$ ) (Speranza et Calzoni, 2005).

### 2.2.2. Taxonomie des Gloméromycota

Bien que des bouleversement ont régulièrement touchés la taxonomie de ce phylum, les analyses moléculaires (en particulier l'analyse de la petite sous-unité ribosomique 18S) ont permis de construire l'arbre phylogénétique des Gloméromycota.

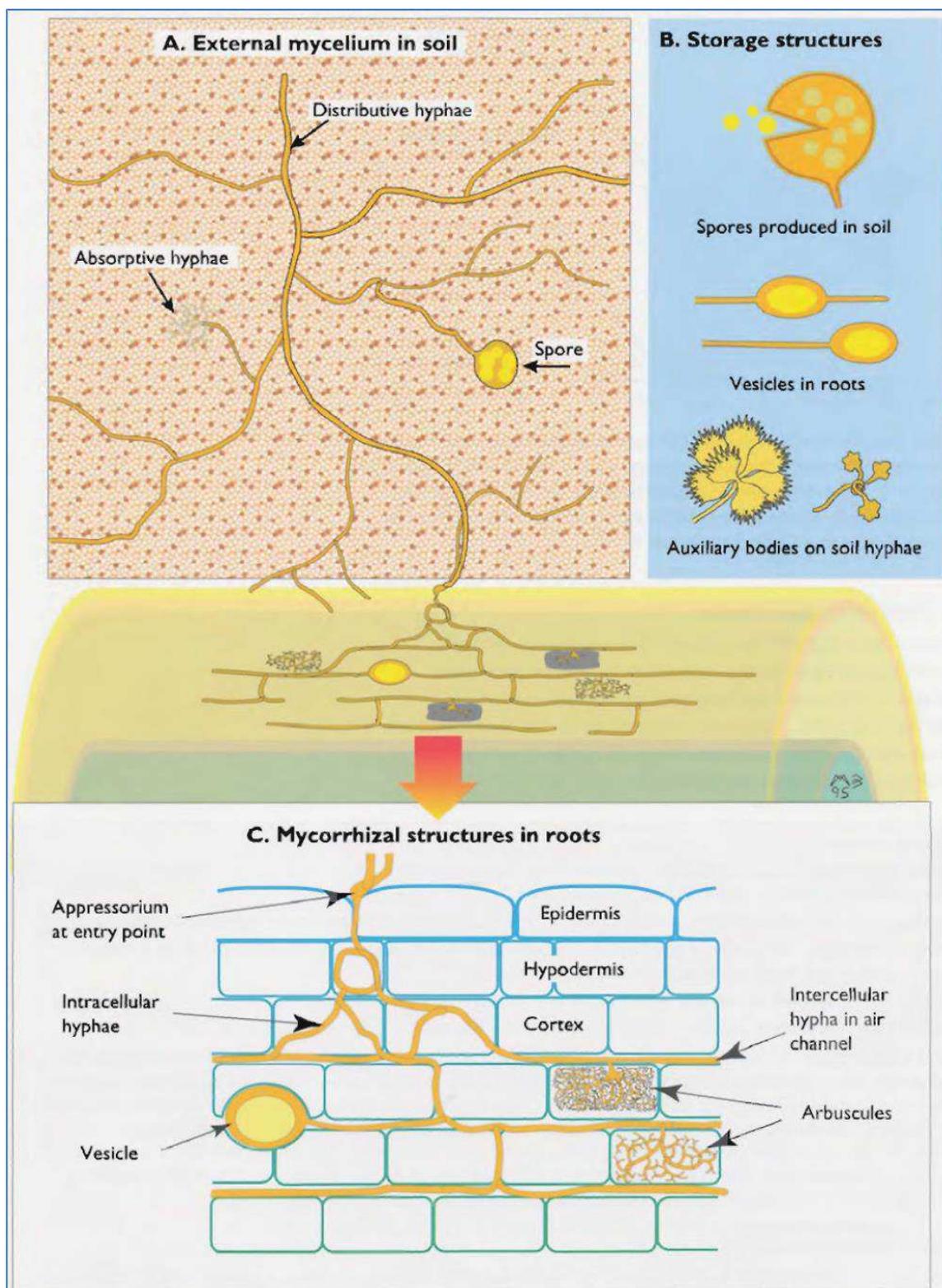


Fig.76 : composants principaux des mycorhizes à arbuscules (Brundrett et al., 1996).

A ce jour, ce phylum regroupe 250 espèces comprenant 18 genres et 4 ordres : les *Glomérales*, les *Diversisporales* et deux lignées plus anciennes : les *Paraglomérales* et les *Archeosporales* (Fig. 77) (Schüßler et Walker, 2011 ; Redecker et al., 2013)

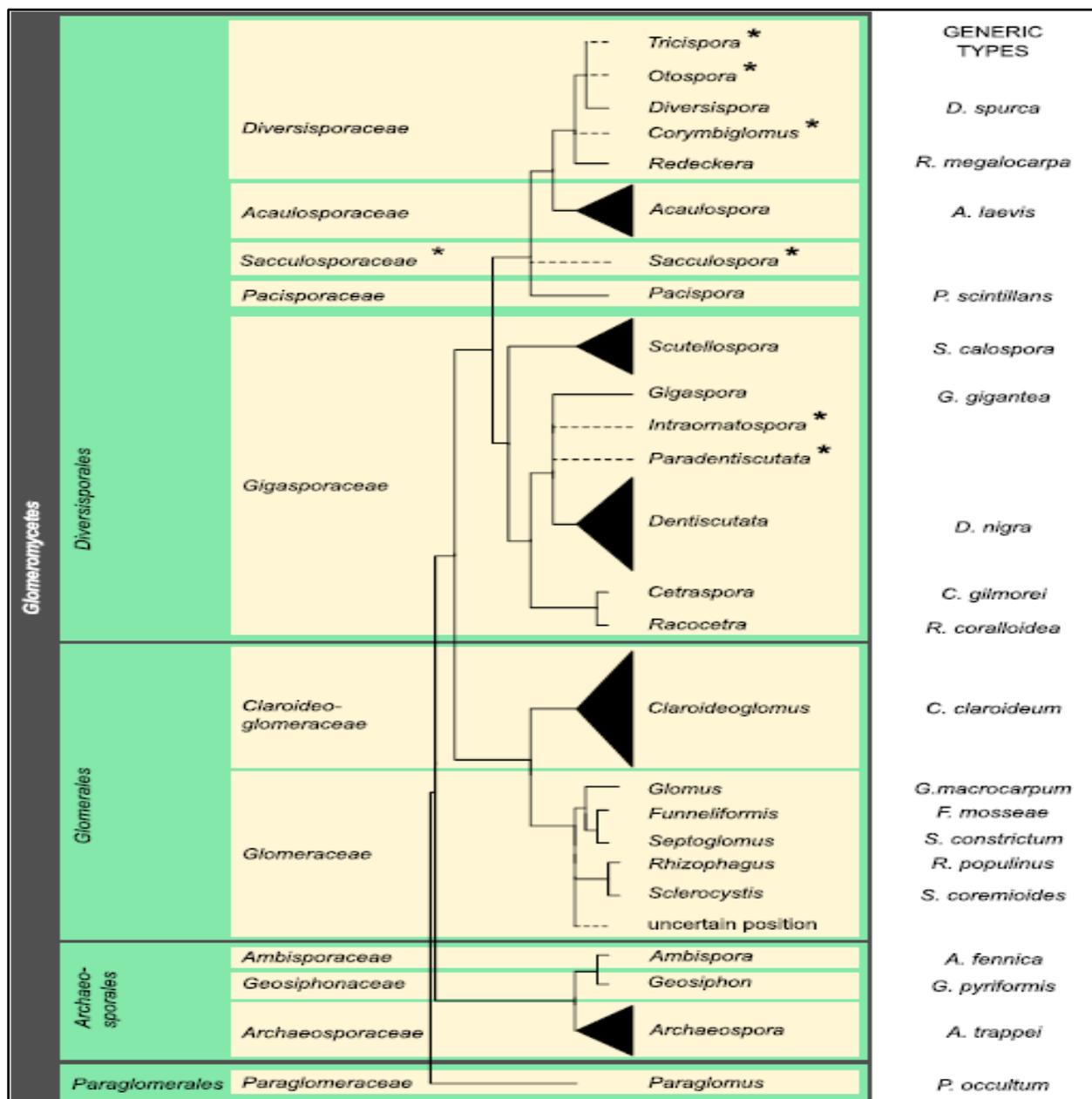


Fig. 77: arbre phylogénétique des glomérormycètes (Redecker et al., 2013).

### 2.2.3. Cycle de développement des VAM

Les VAM sont des biotrophes obligatoires car hétérotrophes pour le carbone et sont incapables de compléter leur cycle de vie de manière asymbiotique (Bonfante et Bianciotto, 1995).

L'établissement de la symbiose mycorhizienne à arbuscule débute par le contact entre la racine compatible avec les hyphes germinatives produites par les propagules du VAM (spores asexuées ou racines déjà mycorhizées) (Requena et al., 2007). Le cycle de développement des VAM se divise en 5 stades (Fig. 78) :

- Stade 1 : Germination des spores et émergence d'un mycélium primaire, ou promycélium.
- Stade 2 : Contact racinaire et développement d'un appressorium.
- Stade 3 : Pénétration du VAM dans la racine et mise en place de la forme intraracinaire du champignon. Le mycélium pénètre à l'intérieur du système racinaire, se renfle en vésicules et forme des arbuscules.
- Stade 4 : La mycorhize ainsi formée produit un réseau extra-racinaire le long duquel sont différenciées de nouvelles spores.
- Stade 5 : Après leur maturation, ces spores seront à l'origine du promycélium de départ (stade 1).

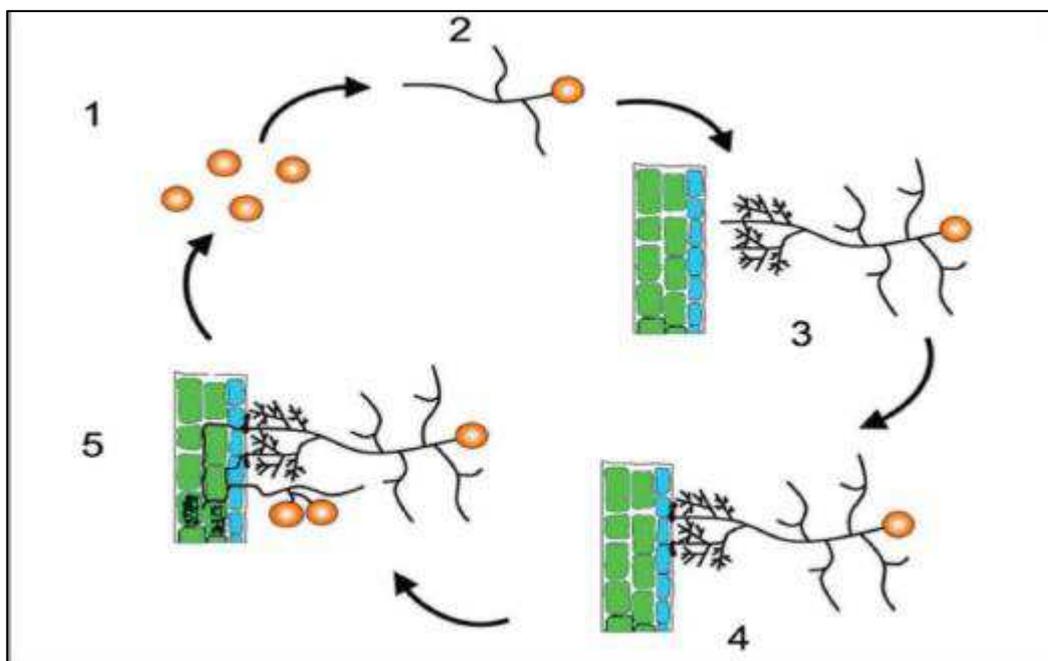


Fig. 78: cycle de développement des VAM (Akiyama, 2007).

#### 2.2.4. Bénéfices des symbioses mycorhiziennes

Les bénéfices de cette symbiose ne sont plus à démontrer. Nous citons cependant les plus importants :

- ✓ L'augmentation du volume de sol exploré et rendu ainsi accessible pour la plante grâce à un réseau d'hyphes pouvant atteindre des dimensions considérables, supérieures à  $10^6$  km/ha (Miller et Jastrow, 1992).
- ✓ Il donne accès aux éléments nutritifs (N, P, K, Mg...etc.), même si leur teneur assimilable dans la solution du sol est très faible. Ce réseau d'hyphes a la capacité de

s'étendre au-delà de la zone d'épuisement du phosphore (déplétion) qui se développe rapidement autour des racines.

✓ L'augmentation du pourvoi en quantité des différents nutriments qui ne sont pas normalement accessibles à la plante (Tarafdar et Marschner 1994, Schweiger et *al.*, 1995, Kahiluoto et Vestberg 1998).

✓ Les bénéfiques de la mycorhization peuvent inclure un meilleur rendement, une accumulation des réserves et/ou une augmentation de la valeur sélective (Lewis et Koide 1990, Stanley et *al.*, 1993).

✓ Les mycorhizes peuvent induire des changements de l'architecture racinaire, des tissus vasculaires, etc... (Daniels Hetrick et *al.*, 1988 ; Miller et *al.*, 1997) optimisant ainsi ses fonctions.

✓ La suppression de la compétition des plantes non hôte par les champignons mycorhiziens a été observée (Allen et *al.*, 1989).

✓ Des quantités significatives de carbone transférées à travers le réseau mycélien qui connecte différentes espèces végétales ont été enregistrées (Simard et *al.*, 1997). Ceci pourrait réduire la compétition entre les plantes et contribuer à la stabilité et la diversité de l'écosystème.

✓ Un transfert possible de nutriments à partir des plantes mortes vers les plantes vivantes (Eason et *al.*, 1991).

✓ La colonisation des racines par les ECM (champignons ectomycorhiziens) et les CMA (champignons mycorhiziens à arbuscules : VAM) peut procurer une protection contre les champignons parasites et les nématodes (Duchesne et *al.*, 1989, Grandmaison et *al.*, 1993 ; Newsham et *al.*, 1995 ; Little et Maun, 1996 ; Cordier et *al.*, 1998 ; Morin et *al.*, 1999).

### **2.2.5. Identification des VAM**

Une technique simple permet d'identifier les principaux genres appartenant aux Gloméromycota, est proposée par Abbott (1982) et McGee (1989 *In* Brundrett, 1996). Pour ce faire, cette technique est basée sur le schéma (patron<sup>2</sup>) caractéristique de colonisation des racines propre aux différents VAM (Fig. 79 et Tableau 56).

Par ailleurs, deux classes morphologiques majeures des VAM ont été identifiées par Gallaud (1904), et parce qu'on considérait qu'elles dépendaient de la plante hôte, elles furent nommées selon la plante dans laquelle elles y furent observées en premier (Dickson, 2004).

---

<sup>2</sup> Traduction du mot anglais « patterns ».

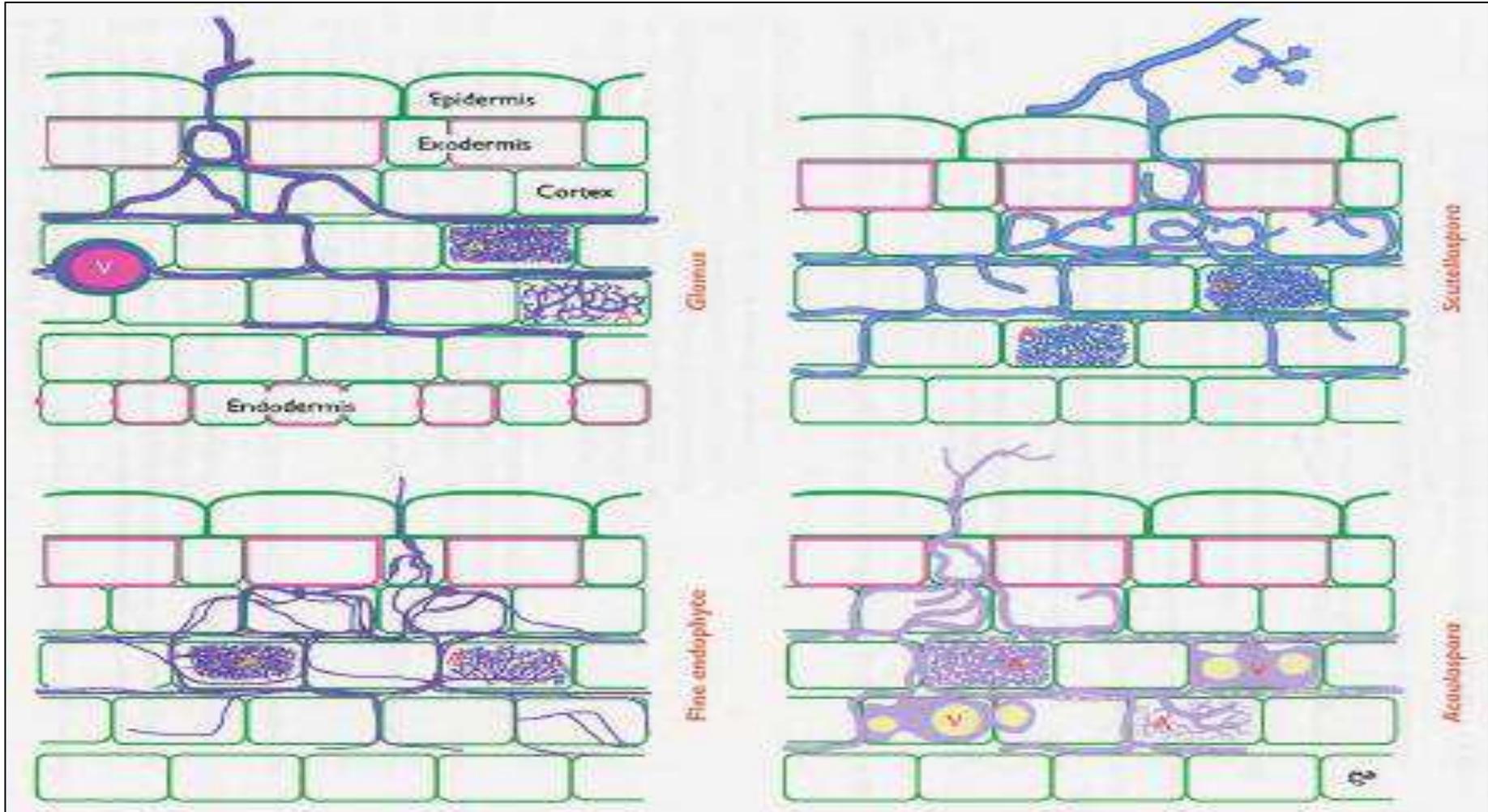
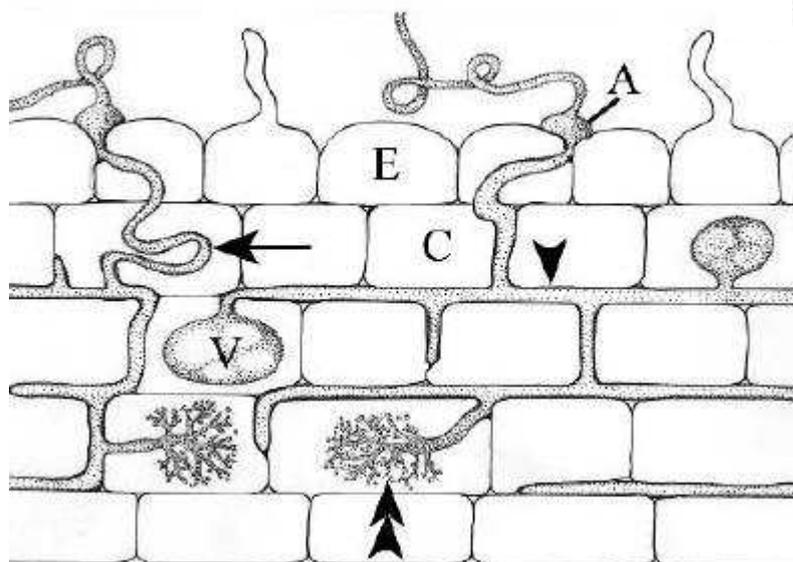


Fig. 79: caractéristiques du schéma de colonisation des racines qui peuvent être utilisées pour l'identification des genres appartenant aux VAM (Abbott,1982 et McGee, 1989, *In* Brundrett et al., 1996).

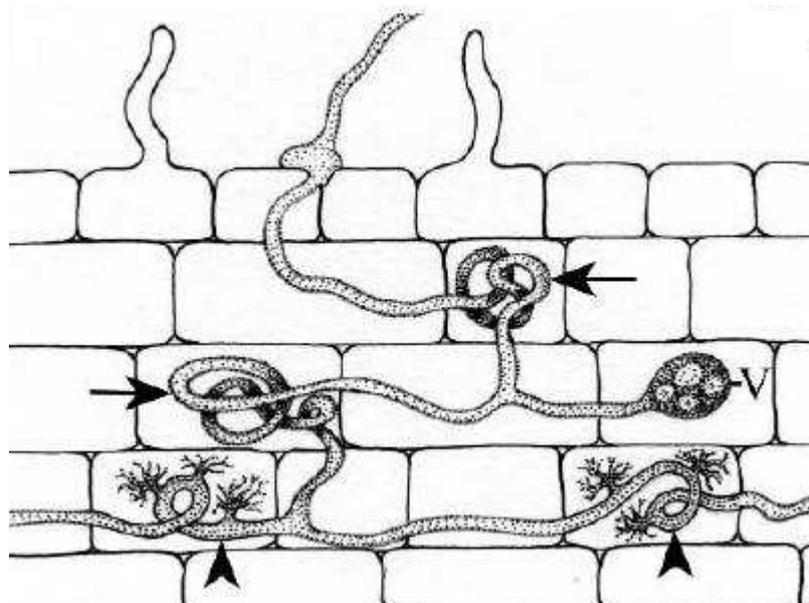
Tableau 56 : descriptif des principales caractéristiques morphologiques des champignons appartenant à cinq genres de VAM lors de la colonisation des racines (Brundrett et *al.*, 1996).

Genre	Caractéristiques
<i>Glomus</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hyphe relativement droit (rectiligne) qui se ramifie le long du cortex racinaire (si l'anatomie le permet). Souvent produit des ramifications en « H » qui résulte d'une croissance simultanée dans deux directions. (La coloration de ces hyphes est relativement foncée.</li> <li>• la forme en « Y » des hyphes en ramification est aussi caractéristiques de la famille des Glomeraceae (Blaszkowski, 2012).</li> <li>• Vésicules ovales, qui se forment généralement entre les cellules du cortex racinaire, sont présents dans de nombreux cas. Ces vésicules persistent dans les racines et souvent développent des parois épaisses et/ou avec des multicouches (feuilletées).</li> </ul>
<i>Acaulospora</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• L'appressorium (hyphe du point d'entrée) a un schéma de ramification caractéristique. Les hyphes à la périphérie du cortex sont généralement plus irrégulièrement ramifiés, bouclés ou enroulés que chez <i>Glomus</i>.</li> <li>• Les hyphes internes ont des parois fines, souvent se colorent faiblement, et ainsi sont difficilement observables. Ils sont souvent rendus plus visibles par des rangées de gouttelettes lipidiques.</li> <li>• Les vésicules intracellulaires remplies de lipides, qui étaient initialement rectangulaires, deviennent souvent lobées irrégulièrement suite à leur expansion aux cellules adjacentes, sont des traits caractéristiques de la plupart des isolats. Ces vésicules ont des parois minces et ne persistent pas dans les racines.</li> </ul>
<i>Scutellospora</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Des hyphes en boucle sont souvent présents près du point d'entrée. Le schéma de ramification pour ce genre est similaire à celui d'<i>Acaulospora</i>, mais les hyphes dans le cortex sont à parois épaisses et se colorent intensément (foncé).</li> <li>• Les vésicules internes ne sont pas présentes. Présence de vésicules externes pigmentées en marron.</li> <li>• Les troncs des arbuscules sont normalement plus longs et épais que ceux de <i>Glomus</i>. Les arbuscules peuvent apparaître « fins et clairsemés » due aux ramifications relativement longues et incurvées.</li> </ul>
<i>Gigaspora</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le schéma de colonisation de ce champignon est très similaire à celui de <i>Scutellospora</i>, mais les hyphes sont plus épais que ceux de la pluparts des champignons vésiculaires arbusculés (VAM).</li> </ul>

La plupart des plantes cultivées produisent le type « *Arum* » car observé pour la première fois chez le genre *Arum* (famille des Araceae) ; le schéma de colonisation de la plante hôte consiste en l'émission d'hyphes intercellulaires et d'arbuscules (Fig. 80 (a)). Alors que beaucoup d'arbres et d'herbacées des forêts forment le type « *Paris* », car observé pour la



**a** : colonisation de type *Arum* (l'hyphes infectieuses depuis l'appressorium (A) pénètre les cellules de l'épiderme (E) avant d'entrer dans le cortex (C) ; fréquemment l'hyphes forme un peloton (flèche) avant d'entrer dans les espaces intercellulaires (tête de flèche) du cortex. Des arbuscules (double têtes de flèches) se forment à l'intérieur des cellules corticales et, selon l'espèce fongique, des vésicules (V) peuvent se former.



**b** : colonisation de type *Paris* (l'hyphes passe de cellule en cellule en formant des pelotons (flèches) et des pelotons arbusculés (têtes de flèches), des vésicules peuvent se former (V).

Fig. 80: deux types principaux de colonisation des VAM (Peterson et *al.*, 2004)

première fois chez le genre *Paris* (famille des Liliaceae) ; ses hyphes intracellulaires se caractérisent par des pelotons (coils) et pelotons arbusculés (arbusculate coils) (Fig. 80(b)) (Dickson, 2004).

### 3. Mycoendophytes

#### 3.1. Caractères généraux

« Endophyte » signifie littéralement « dans la plante » et donc englobe potentiellement un large spectre d'hôtes et de symbiotes (bactéries, champignons, insectes, algues...) (Schulz and Boyle, 2006). Dans ce travail nous utilisons la définition de Brundrett (2004) selon laquelle, les associations endophytiques diffèrent de celles mycorhiziennes principalement par l'absence d'interface localisées d'hyphes spécialisés, par l'absence d'un développement « plante-champignon » synchronisé, et l'absence de bénéfices pour la plante hôte lors du transfert de nutriments. En effet, les rares études ultrastructurales (sur les champignons endophytes) montrent que leurs hyphes intracellulaires ne présentent pas de membrane périfongique, dérivée de la plante hôte et de matériel matriciel interfacial ; ce qui soulève le problème quant aux mécanismes d'échanges avec la plante hôte. Les observations ultrastructurales ont montré des hyphes intracellulaires toujours entourés de matériel fibreux, mais pas de membrane périarbusculaire dérivée de l'hôte (Peterson et al., 2008).

Concomitamment aux champignons mycorhiziens, les champignons endophytes colonisent entre autre les tissus racinaires et y développent des hyphes septés produisant des structures caractéristiques appelées microsclérote (Fig. 81 et Fig. 82) ; mais leurs identités et leurs hôtes préférés restent largement inconnus (Kernaghan and Patriquin, 2011).

En effet, contrairement à la pléthore de connaissances sur les champignons ectomycorhiziens et endomycorhiziens, très peu est connu sur les champignons endophytes. Ces derniers sont largement classés parmi les champignons à conidies ou les endophytes septés stériles, qui forment des structures mélanisées comme les hyphes inter et intracellulaires et les microsclérotés dans les racines des plantes et qui sont connus ou ont de probables affinités avec les Ascomycètes (Jumpponen and Trappe, 1998). Cependant, les racines de plus de 600 espèces de plantes représentant quelques 320 genres et plus de 110 familles ont été reconnues être colonisés par les endophytes foncés septés (DSE<sup>3</sup>) (Ahlich and Sieber, 1996 ; Barrow and Osuna, 2002 ; Jumpponen and Trappe, 1998b ; Kovacs and Szigetvari, 2002 ; Ruotsalainen et al., 2002; Schadt et al., 2001).

---

<sup>3</sup> Dark Septate Endophyte

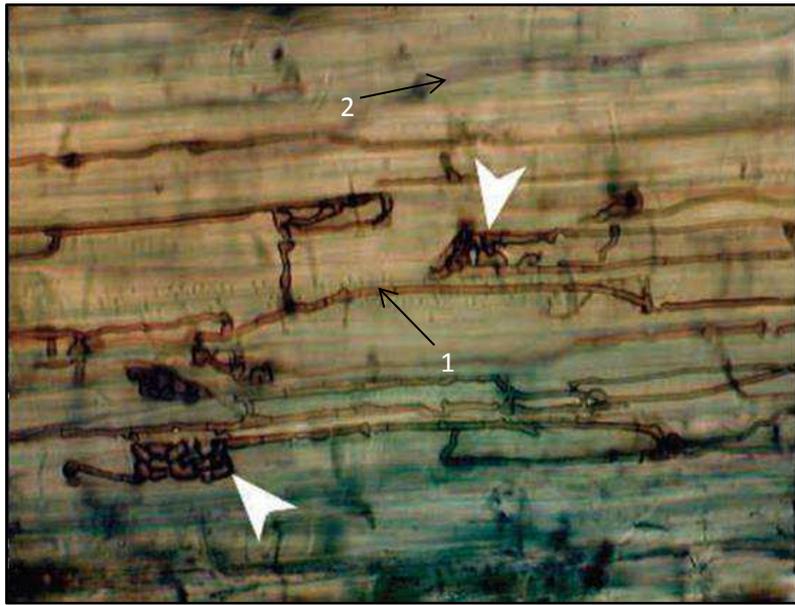


Fig. 81: microsclérotés (têtes de flèches), hyphes marrons septés de surface (1) et ceux internes (2) d'un endophyte foncé septé (Dark Septate Endophyte : DSE) (Peterson et *al.*, 2004).

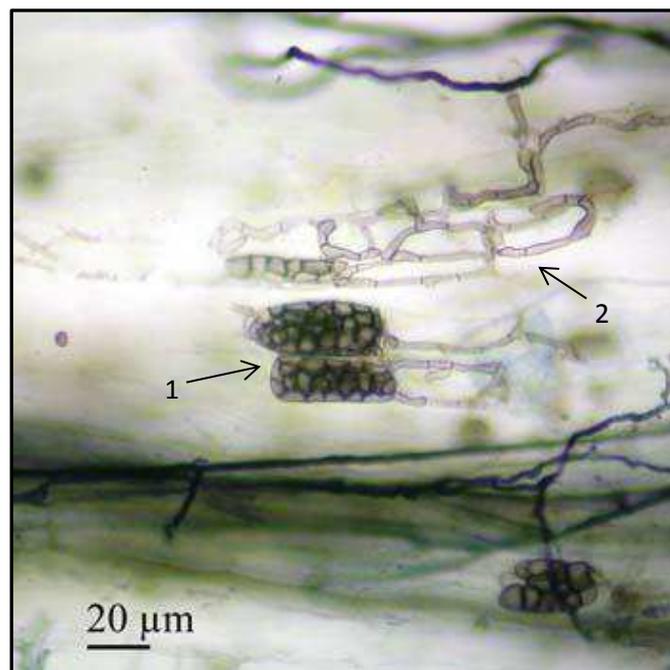


Fig. 82: microsclérotés (1) et hyphes septés (2) d'un DSE.

(Source : <http://botany.thismia.com/2010/02/28/dark-septate-endophytes/>)

Le pistachier de l'Atlas n'est pas en reste, les travaux des équipes du laboratoire « Ressources Naturelles » de l'université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou ont mis en

évidence la richesse de cette espèce en mycoendophytes foliaires, notamment à travers les travaux de Zareb (2014), suivis de ceux de Benfodil (2015). D'autres équipes du même laboratoire ont mis en évidence la présence des mycoendophytes dans les racines du pistachier de l'Atlas, nous citerons les travaux de Mechiah (2015) qui ont confirmé les résultats de ses prédécesseurs au sein du laboratoire, à savoir Hadj Benamane et Ould Amrouche (2009), Raab (2010) et Redjdal (2010).

Contrairement aux champignons mycorhiziens, des études ont montré que les endophytes peuvent envahir les tissus vasculaires (Peterson et *al.*, 2004), donc traversent la barrière pericyclique. De plus, les endophytes sont régulièrement présents dans les racines présentant une croissance secondaire (Sieber and Grünig, 2006).

Cependant et du point de vue fonctionnel, la distinction entre champignons mycorhiziens et non mycorhiziens n'est pas toujours tranchée. Non seulement le champignon mycorhizien peut devenir pathogène, mais, par exemple, l'endophyte foncé septé (DSE) peut assumer les fonctions mycorhiziennes (Jumpponen and Trappe 1998 *In* Schulz et *al.*, 2006).

### **3.2. Taxonomie des endophytes racinaires**

Les espèces de mycoendophytes font partie pour la plupart des Ascomycètes ; mais aussi des Basidiomycètes et des Zygomycètes (Marquez et *al.*, 2007). Ils sont usuellement classés en Clavicipitaceae (colonisateurs d'herbes) et Non Clavicipitaceae (généralement colonisateurs des ligneux) (Hyde et Soyong, 2008). Ces deux types sont répartis en quatre classes selon la biodiversité, la transmission, le mode de colonisation et les bénéfices mutuels, ainsi que la nature de la plante hôte (Rodriguez et *al.*, 2009) (Tableau 57).

Il apparaît que les champignons endophytes qui colonisent les racines sont des Non Clavicipitacées qui font partie de la classe 2 et de la classe 4.

### **3.3. Fonctions et rôles des endophytes**

Selon Kageyama et *al.*, (2008) les endophytes ont potentiellement plus d'effets adverses que d'effets positifs sur la biomasse de l'hôte. Paradoxalement, basé sur un nombre limité de publications qui traitent sur les rôles possibles des endophytes, Maydyam et Jumpponen (2005) soutiennent que les symbioses endophyte-plante pourraient être considérées « multifonctionnelle ». Les endophytes pourraient améliorer la résistance des plantes aux pathogènes et/ou aux herbivores et renforcer la tolérance de l'hôte aux stress.

Tableau 57: critères symbiotiques pour caractériser les classes de champignons endophytes (Rodriguez *et al.*, 2009).

Critères	Clavicipitaceae	Non Clavicipitaceae		
	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4
Classe d'hôte	Limité	Vaste	Vaste	Vaste
Tissu(s) colonisé	Pousses et rhizomes	Pousses, racines et rhizomes	Pousses	Racines
Colonisation dans la plante	Extensive	Extensive	Limitée	Extensive
Biodiversité au niveau de la plante	Basse	Basse	Elevée	Inconnue
Transmission	Horizontale et verticale	Horizontale et verticale	Horizontale	Horizontale
Avantages	NHA	NHA et HA	NHA	NHA

NHA : avantages comme la tolérance à la sécheresse, amélioration de la croissance.

HA : les avantages résultent de la spécificité de l'habitat et les pressions de sélection comme le pH, température et la salinité.

### 3.3.1. Rôle des endophytes dans la croissance de l'hôte et l'acquisition des nutriments

Les endophytes pourraient améliorer la croissance en produisant des phytohormones, sans facilitation apparente de l'acquisition des nutriments par la plante hôte, ou stimulation du métabolisme de la plante hôte. Les champignons endophytes pourraient augmenter la biomasse en produisant des hormones de croissance ou en induisant la production d'hormones par l'hôte (Petrini, 1991 ; Shulz et Boyle, 2005).

Plusieurs associations racine-endophytes pourraient être impliquées dans le transfert des nutriments et l'amélioration de la croissance dans au moins certains cas. Cependant, la diversité des endophytes et leurs interactions avec leurs hôtes compliquent les généralisations, comme toute combinaison d'hôte et d'espèces ou des souches d'endophytes peuvent se comporter différemment. A cet égard, nous sommes limités dans nos conclusions contrairement aux systèmes mycorhiziens (Johnson *et al.*, 1997) ; les symbioses racines-

endophytes tendent à être idiosyncratiques<sup>4</sup> et contexte dépendants ; autrement dit, les symbioses avec les endophytes doivent être jugées au cas par cas, sans tentative de généralisation.

Une méta-analyse réalisée par Newsham (2011) sur les réponses des plantes aux colonisations de leurs racines par les DSE, n'a pas enregistré d'effets négatifs sur les performances des plantes ; des effets positifs ont été identifiés sur la biomasse totale des tiges et des racines, sur les teneurs en azote (N) et en phosphore des tiges, avec une augmentation de 26 à 103% de ces paramètres pour les plantes inoculées avec les DSE, comparées aux plantes témoins ; l'inoculation augmente de 52 à 138% la biomasse totale des tiges et des racines, quand les plantes ne sont pas supplémentées d'azote inorganique, ou quand la totalité ou la majorité de l'azote est supplémenté sous forme organique ; l'inoculation par le DSE (*Phialocephala fortinii*) a augmenté la biomasse des tiges et des racines, la concentration en P et la teneur en N des tiges de 44 à 116% comparativement aux plantes témoins ; les analyses suggèrent que les DSE améliorent les performances de la plante sous des conditions contrôlées, particulièrement quand la totalité ou la majorité de l'azote est sous forme organique.

### **3.3.2. Rôle des endophytes dans la résistance aux pathogènes et insectes nuisibles**

#### **a. Protection contre les pathogènes**

Dans le passé récent, certains rapports ont suggéré que quelques endophytes peuvent améliorer la résistance des plantes aux pathogènes ; il y a au moins trois mécanismes primaires par lesquels les endophytes peuvent améliorer la résistance des plantes aux pathogènes (Mandyam et Jumpponen, 2005).

Le premier mécanisme est basé sur l'utilisation préventive des ressources par les endophytes et la compétition des endophytes et des pathogènes pour les mêmes ressources (Lockwood, 1992).

Le second mécanisme possible du contrôle des pathogènes pourrait résulter et dériver de l'inhibition chimique des pathogènes racinaires. Une colonisation bénigne et asymptomatique des endophytes pourrait améliorer l'habilité de l'hôte à produire des composants biocides, comme dans le cas de *Spilanthes calva* après inoculation avec *Phytophthora indica* (Rai *et al.*, 2002).

---

<sup>4</sup> Prédilection particulière de l'organisme qui fait qu'un individu réagit d'une manière personnelle à l'influence des agents extérieurs.

Le troisième mécanisme possible est l'induction par l'endophyte de réponses défensives de la part de la plante hôte. Des modifications structurales et l'induction de signaux de défense peuvent résulter de la colonisation par les endophytes d'une façon similaire à celle de la colonisation mycorhizienne comme l'on montré les travaux de Narisawa et *al.* (2004).

#### **b. Protection contre les insectes nuisibles et les herbivores**

Mandyam et *al.* (2005) suggèrent trois mécanismes possibles par lesquels l'association racine-endophytes peut améliorer la résistance des plantes hôtes aux herbivores et autres insectes nuisibles. Le premier mécanisme est basé sur l'amélioration de la performance globale de la plante par l'endophyte, ce qui aide la plante à tolérer les herbivores et supporter les dommages sans effets visibles sur la productivité (Gehring et Whitham, 2002).

Le second mécanisme est l'altération de la chimie nutritionnelle de la plante, à la fois qualitativement et quantitativement, en altérant les teneurs en carbohydrates et en azote, le ratio C : N et la composition en phytostérois (Jones et Last, 1991 ; Bernays, 1993 ; Schulz et Boyle, 2005). L'endophyte est capable d'altérer les niveaux de teneurs en nutriments dans les plantes hôtes. Ceci, couplé à l'altération du métabolisme des carbohydrates, peut affecter la susceptibilité hôte-herbivore.

Le troisième mécanisme possible est la production de répulsifs alimentaires par l'endophyte lui-même (Hallman et Sikora, 1996).

### **4. Matériel et méthodes**

#### **4.1. Echantillonnage des racines**

Lors de la réalisation du profil racinaire de chaque individu (*cf.* Chapitre II : Matériels et méthodes), nous avons aussi échantillonné des racines de moins de 1 cm de diamètre avec leurs ramifications. Nous tenions à les récupérer à chaque fois que cela était possible avec leurs sols rhizosphériques, afin de préserver aux mieux les racines fines et éviter leurs dessèchement (l'air libre étant plus asséchant que le sol). Elles furent mises dans des sacs hermétiques et étiquetées. Nous avons ainsi échantillonnés les racines de chaque individus appartenant à chaque échantillon des quatre populations de pistachier de l'Atlas, à savoir celles de Sidi Naamane (Médéa), de la daya d'el Mergueb (M'sila), de la daya de Lekhneg (Laghout) et enfin de Béni Ounif (Béchar).

Au laboratoire, nous avons délicatement libéré les racines de leurs sols rhizosphériques. A l'aide d'un pied à coulisse numérique, nous avons sélectionné les racines de moins de 1 mm de diamètres. En effet, ce sont celles qui sont les plus à même de contenir des mycorhizes, car elles ne contiennent pas de structure secondaire (uniquement la structure primaire) (Drénou, 2006).

Les racines sélectionnées sont aussitôt préservées dans une solution de formol à 50 % (v/v) et gardées en vue de leurs blanchiments et leur coloration pour la mise en évidence des champignons mycorhiziens et endophytiques potentiels.

#### **4.2. Blanchiment des racines**

Les racines du pistachier de l'Atlas sont très foncées car très chargées en tanins. Nous peinions à les décolorer. Après un rinçage à l'eau courante pour éliminer la solution fixative (le formol), nous avons mis séparément des échantillons de racines de chaque station dans des béchers.

Les échantillons de racines choisis sont complètement et largement immergés dans une solution de KOH (à 10% w/v) et mis à l'étuve (à 90°C) pendant une heure. A leur sortie de l'étuve, nous laissons les racines (toujours immergées dans le KOH) pendant toute la nuit. Le lendemain, nous remplaçons le KOH brun (ou jaunît, cela dépendait de la concentration en tanins dans les racines utilisées) par une solution fraîche et un nouveau passage à l'étuve (à 90°C) pendant une heure, et ainsi de suite jusqu'à blanchiment des racines.

Selon la teneur des racines en tanins, la durée nécessaire au blanchiment des racines du pistachier de l'Atlas peut aller jusqu'à 8 jours (pour les plus chargées). Il est impératif de vérifier visuellement le degré de blanchiment des racines avant de relancer un nouveau cycle.

Les racines ainsi blanchies sont immergées dans de l'eau acidulée (HCl à 2%) pendant 30 mn, afin de neutraliser le KOH.

#### **4.3. Coloration des racines**

Selon le même protocole (Brundrett et *al.*, 1996), et après rinçage à l'eau courante, nous avons mis les racines dans une solution de bleu trypan (0.05% w/v dans le lactoglycérol), puis chauffé à l'étuve (90°C) pendant 4 heures. Les racines sont ensuite laissées toute la nuit immergées dans le colorant.

La qualité de la coloration étant améliorée par la décoloration des racines, nous les avons immergées dans une solution de glycérol à 50% pendant plusieurs jours avant leur observation, pour permettre aux racines de se dégorger de la quantité de colorant excédentaire.

#### **4.4. Observation au microscope photonique**

Pour faciliter leur observation et examen, il est souhaitable de ne mettre que deux ou trois racines par lame uniquement, et de les disposer en parallèle l'une par rapport à l'autre, il sera ainsi plus facile de manipuler la platine. Une fois recouverte d'une lamelle, on appuie légèrement sur la lamelle, de façon à écraser les racines sans les dissocier. On insiste à libérer les bulles d'air emprisonnées, car elles constituent un obstacle réel et des artefacts supplémentaires.

On observe alors au microscope photonique. Les observations pertinentes ont été photographiées grâce à un appareil photo numérique de haute définition FUJIFILM (12.2 Mégapixels, FINEPIX J38).

#### **5. Résultats et discussion**

Rappelons que l'identification des genres des VAM s'est basée sur les schémas caractéristiques de colonisation des racines propre aux différents genres de champignons appartenant aux VAM (*cf.* Matériels et méthodes). Evidemment, cette méthode n'a pas la précision d'une identification par les spores et encore moins de PCR appropriées, ainsi, nous proposons ces résultats avec toutes les réserves qui s'imposent.

Par ailleurs, pour optimiser la discussion de nos résultats, nous avons opté pour les présenter en deux volets. Le premier volet est consacré aux résultats et leur discussion par station et le deuxième volet se veut synthétique en adoptant une approche intégrative des quatre populations selon le gradient d'aridité considéré à l'origine dans cette thématique.

##### ***Volet I : Approche intra-populationnelle***

###### **A. La population de Sidi-Naamane (Médéa)**

###### **1. Résultats**

Toutes les racines examinées n'ont montré ni ectomycorhizes ni ectendomycorhizes. Par contre, elles sont toutes endomycorhizées. Quelques-unes ont présenté des structures fongiques endophytiques.

###### **1.1. Endomycorhizes à arbuscules (VAM)**

Nous avons pu identifier trois genres de VAM.

a. Le genre *Glomus* : qui forment des hyphes intercellulaires décrivant des branches en forme de « Y » (Fig.83)

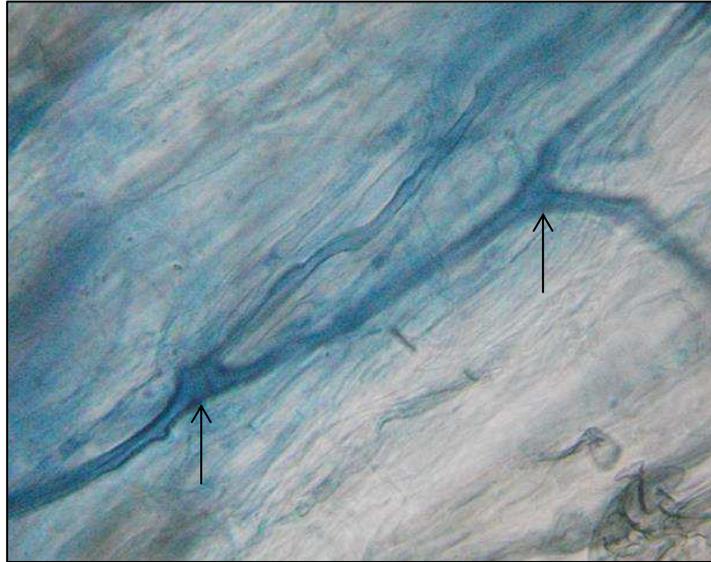


Fig.83 : ramifications en « Y » des hyphes intercellulaires (flèches) caractéristiques du genre *Glomus* (×400).

b. Le genre *Acaulospora* : reconnaissable grâce à leurs hyphes faiblement colorés et leurs vésicules rectangulaires à paroi fine qui envahissent le milieu intracellulaire. Ses vésicules sont remplies de gouttelettes lipidiques (Fig. 84).

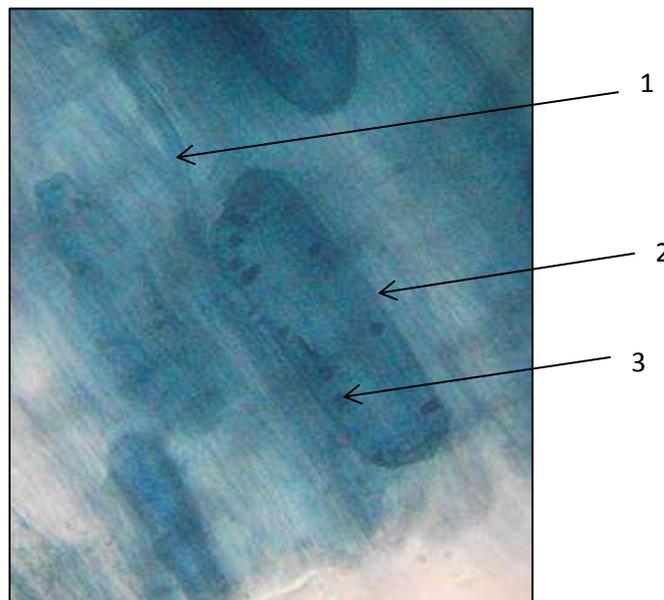


Fig.84 : hyphes faiblement colorés (1) et vésicules rectangulaires à paroi fine (2) remplies de gouttelettes lipidiques (3) du genre *Acaulospora* (×400).

c. Le genre *Scutellospora* : ayant observé leur vésicules auxiliaires pigmentées en marron à la surface de la racine et associées aux hyphes externes (Fig.85).

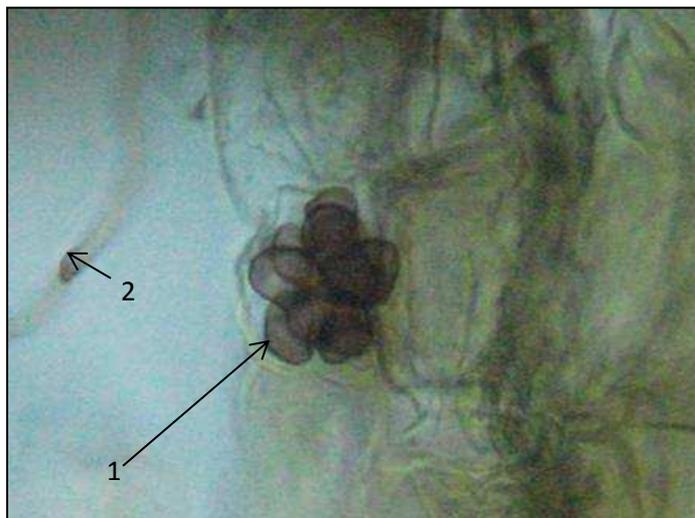


Fig.85 : vésicules auxiliaires externes pigmentées en marron (1) et hyphe externe (2) du genre *Scutellospora* (×400).

Notons que dans les échantillons examinés, nous n'avons pas retrouvé d'arbuscules.

Par ailleurs, nous avons aussi retrouvé les deux types morphologiques de VAM.

➤ Le type « *Arum* » : avec ses hyphes intercellulaires (Fig.86).

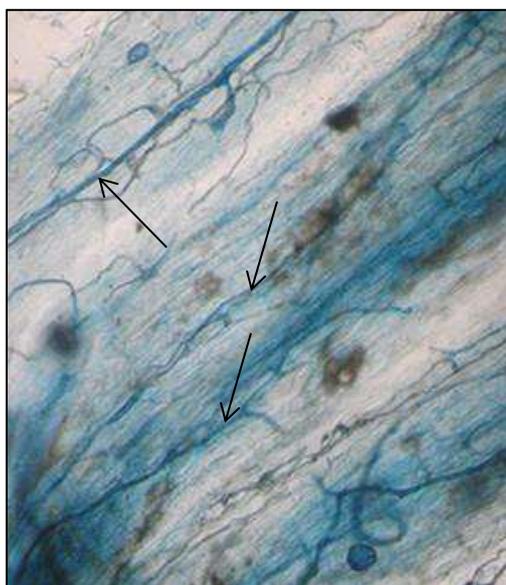


Fig.86 : hyphes intercellulaires (flèches) caractéristiques du type « *Arum* » (×100).

➤ Le type « *Paris* » : avec ses hyphes en pelotons (coils) intracellulaires (Fig.87).

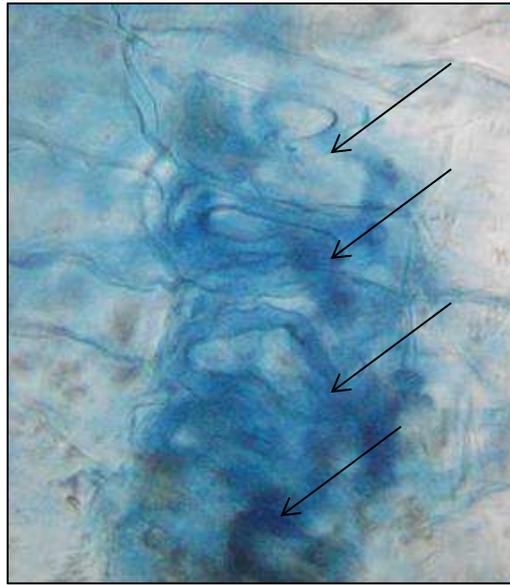


Fig.87 : coils intracellulaires (flèches) caractéristiques du type « Paris » (×400).

### 1.2. Endophytes septés

Nous avons pu observer des filaments marron septés en surface de la racine et qui plongent à l'intérieur du cortex racinaire (Fig.88). Des microsclérotos matures occupent l'intérieur de cellules corticales (Fig. 89).

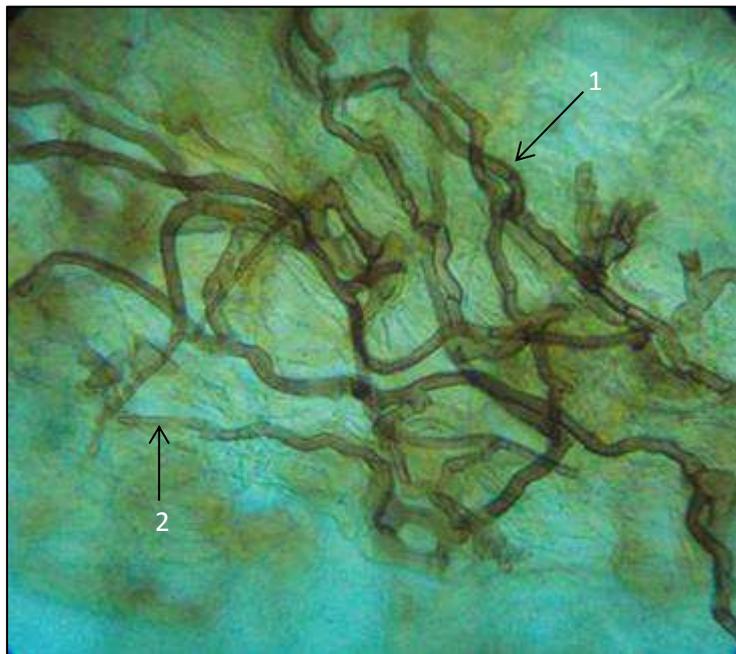


Fig. 88 : hyphes marron septés de surface (1) et interne (2) de DSE (×400).



Fig.89 : microsclérote (1) et hyphe (2) de DSE dans le cortex racinaire (×400).

## 2. Discussion

La présence de trois genres de VAM dans les racines des individus échantillonnés à Sidi Naamane montent le caractère hypermycotrophe du pistachier de l'Atlas. Cette richesse générique sous-tend par extension une richesse spécifique, indicatrice d'une bonne stabilité des sols sous-jacents. En effet, nous avons échantillonné dans des zones à l'écart des activités agricoles. Plusieurs études ont montré que l'intensité d'exploitation et le système cultural influencent beaucoup la diversité et les communautés des champignons VAM (Oehl et *al.* 2003). Une grande biodiversité a été observée dans les prairies et les pâturages, tandis que les terres assolées intensives contiennent souvent nettement moins d'espèces. Les genres *Gigaspora*, *Scutellospora*, *Racocetra* et *Cetraspora* notamment semblent souffrir d'un travail du sol fréquent, car elles ne parviennent que difficilement à raccorder les filaments mycéliens rompus (de la Providenzia et *al.*, 2005).

L'absence d'arbuscules peut être due à plusieurs raisons. La première est simplement la probabilité d'avoir échantillonné des racines qui n'en ont pas encore formé. La deuxième est qu'il en existe, mais ils n'ont pas été colorés au bleu trypan et sont restés hyalins (faible concentration en chitine). La troisième suppose que les mycorhizes observées sont en fin de cycle et que ce n'est pas la phase active d'échange entre les deux partenaires. La quatrième est l'insuffisance probable de l'échantillon.

Quant aux deux types morphologiques de VAM, il faut rappeler que leurs différences sont surtout expliquées par l'espace intercellulaire au niveau du parenchyme cortical. En effet, plus il y a d'espace entre ces cellules, plus le type « *Arum* » est privilégié, car il est plus facile aux hyphes fongiques de coloniser la racine en suivant naturellement les voies de moindre résistance. Autrement, si l'espace est restreint, les hyphes sont contraints de passer de cellule en cellule, le type « *Paris* » s'installe ainsi (Dickson, 2004). La présence des deux types morphologiques dans les racines examinées montre qu'il y a une diversité histologique des racines du pistachier de l'Atlas qu'il serait intéressant d'étudier ; nous pourrions dès lors déterminer les conditions (intrinsèques et/ou extrinsèques) préluces à l'expression de l'un des deux types morphologiques de VAM.

La présence d'endophytes dans ces racines et sans symptômes délétères, montre que cette association est potentiellement bénéfique pour les deux partenaires. En effet, la grande abondance et le vaste éventail de plantes hôtes (Jumpponen et Trappe 1998) des DSE, suggèrent qu'ils ont des fonctions importantes dans les écosystèmes, mais qui restent inconnues (Manydam et Jumpponen 2005).

## **B. La population de la daya d'el Mergueb (M'sila)**

### **1. Résultats**

Toutes les racines examinées n'ont montré ni ectomycorhizes ni ectendomycorhizes. Par contre, elles sont toutes endomycorhizées présentant quelquefois des structures fongiques endophytiques à différents stades de maturation.

#### **1.1. Endomycorhizes à arbuscules (VAM)**

Dans les échantillons examinés, nous avons pu identifier trois genres de VAM.

- a. Le genre *Glomus* : avec ses vésicules ovales intercellulaires (Fig. 90).
- b. Le genre *Acaulospora* : reconnaissable grâce à leurs hyphes faiblement colorés et leurs vésicules rectangulaires à paroi fine et qui envahissent le milieu intracellulaire. Ses vésicules sont remplies de gouttelettes huileuses (Fig. 91).
- c. Le genre *Scutellospora* : les arbuscules observés dans les cellules du cortex racinaire sont à tronc épais (Fig. 92).

Par ailleurs, nous avons aussi retrouvé les deux types morphologiques de VAM.

- Le type « *Arum* » : avec ses hyphes intercellulaires (Fig.93).
- Le type « *Paris* » : avec ses hyphes en pelotons (coils) intracellulaires (Fig.94).

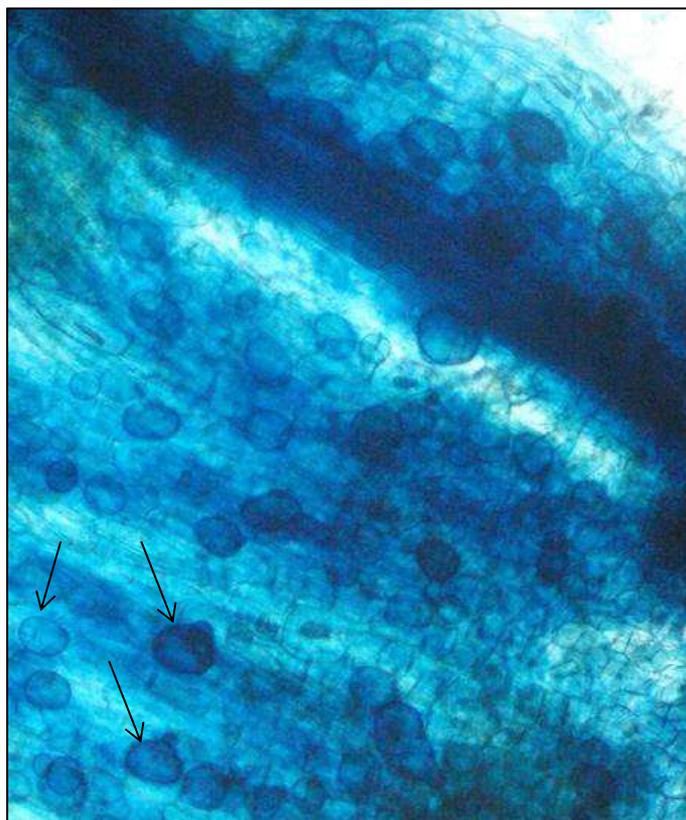


Fig. 90 : vésicules ovales intercellulaires (flèches) caractéristiques du genre *Glomus* ( $\times 100$ ).

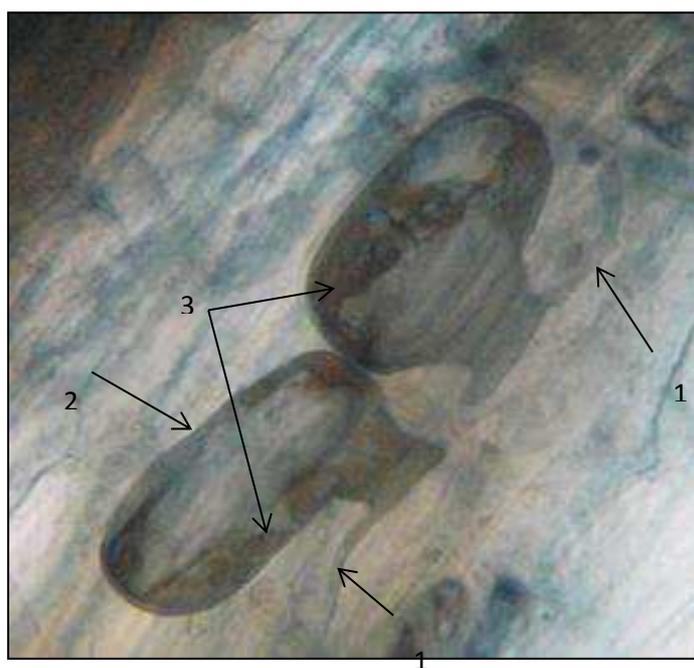


Fig. 91: hyphes (1) et vésicules (2) remplies de gouttelettes lipidiques (3) caractéristiques du genre *Acaulospora* ( $\times 400$ ).

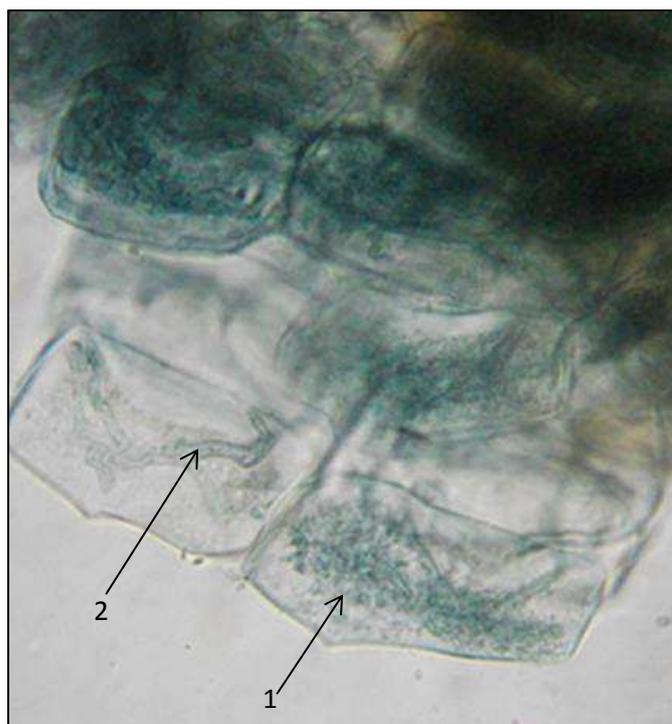


Fig. 92 : arbuscules (1) à troncs épais (2) caractéristiques du genre *Scutellospora* (×400).



Fig. 93 : hyphes intercellulaires (flèches) caractéristiques du type « *Arum* » (×100).

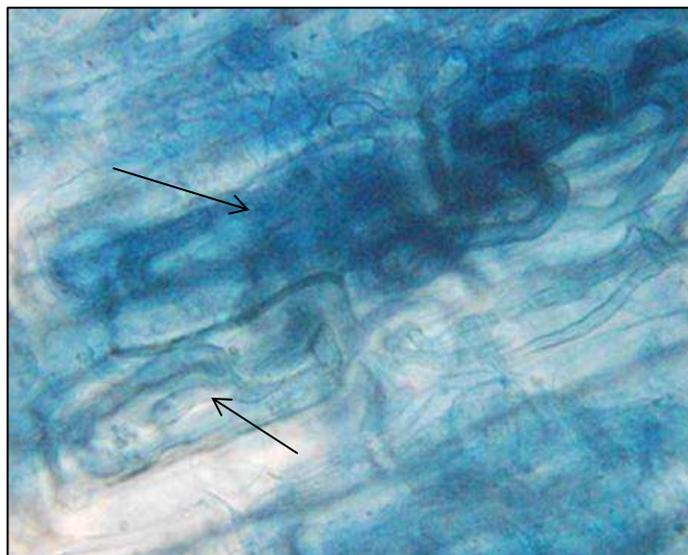


Fig. 94 : hyphes en pelotons (coils) intracellulaires (flèches) caractéristiques du type « Paris »  
(×400).

## 1.2. Endophytes septés

Dans quelques échantillons, nous avons pu observer des filaments marron septés externes et internes, ainsi que des microsclérotés à l'intérieur des cellules corticales (Fig.95).

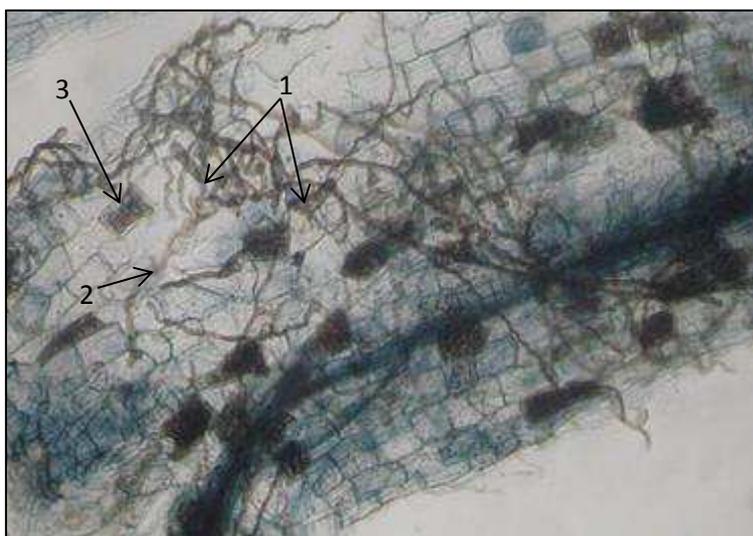


Fig. 95 : hyphes marron septé de surface (1) et interne (2) et microsclérotés (3) de DSE  
(×100)

Par ailleurs, nous avons pu observer des microsclérotés en maturation (colorés au bleu trypan) à l'intérieur des cellules du cortex racinaire (Fig.96).

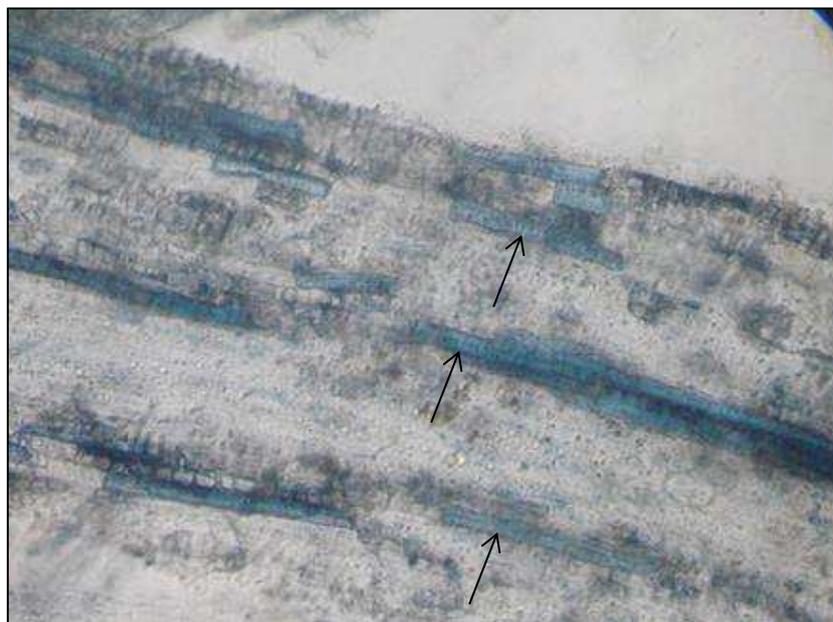


Fig. 96 : microsclérotés de DSE en maturation (flèches) ( $\times 100$ ).

Signalons que nous avons observé des structures marron en « pelote de laine » que nous n'avons pas pu identifier (Fig.97).

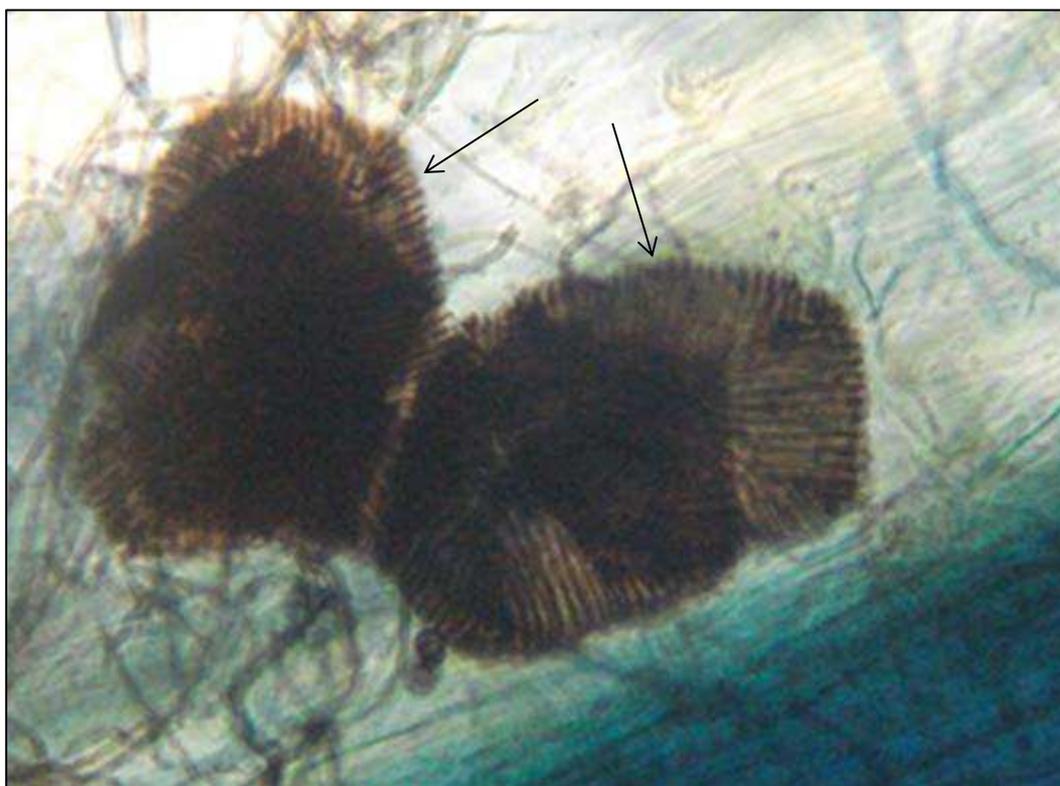


Fig. 97 : structures marron en « pelote de laine » (flèches) non identifiées à la surface de la racine ( $\times 400$ ).

## 2. Discussion

Nous constatons que les racines examinées sont colonisées par au moins trois genres de VAM. Cela souligne encore une fois le caractère hypermycotrophe de cette espèce d'une part, et d'autre part que les sols sous-jacent sont *a priori* stables à l'abri des travaux agricoles perturbants (du moins directement). En effet, rappelons que nous avons échantillonné dans une daya où la majorité des individus végètent dans les *nebkhas* à l'abri donc des perturbations éventuelles liées aux activités anthropiques. Ces conditions de stabilité favorisent la diversité des VAM (de la Providenzia et *al.*, 2005).

Par ailleurs, nous avons pu cette fois-ci observer nettement des arbuscules, ce qui montre un état d'activité conséquent des mycorhizes constituées. Ainsi, nous pouvons dire que nous avons échantillonné au moment opportun pour cette population et qui coïncide avec le mois de mars.

Les deux types morphologiques (*Arum* et *Paris*) sont présents, ce qui montre une diversité histologique des racines des pistachiers de l'Atlas de la daya d'el Mergueb. Selon Dickson (2004), les hyphes en croissant dans le cortex racinaire suivent les espaces de moindre résistance, c'est le cas des espaces intercellulaires qui, lorsqu'ils sont disponibles favorisent l'installation du type « *Arum* », dans le cas contraire, les hyphes sont contraints de passer de cellule en cellule ce qui permet d'installer le type « *Paris* ».

La présence sans symptômes délétères d'endophytes racinaires montre encore une fois l'intérêt que porte la plante hôte à permettre cette relation qui paraît augmenter sa valeur sélective. En effet, l'abondance et la diversité des DSE sous entendent des fonctions importantes dans les écosystèmes (Jumpponen et Trappe, 1998 ; Manydam et Jumpponen, 2005).

### C. La population de la daya de Lekhneg (Laghouat)

#### 1. Résultats

Toutes les racines examinées n'ont montré ni ectomycorhizes ni ectendomycorhizes. Par contre, elles sont toutes endomycorhizées présentant souvent des structures fongiques endophytiques à différents stades de maturation.

##### 1.1. Endomycorhizes à arbuscules (VAM)

Dans les échantillons examinés, nous avons pu identifier deux genres de VAM.

a. Le genre *Glomus* : que nous avons pu identifier par le biais des vésicules ovales intercellulaires caractéristiques (Fig. 98), mais aussi par la présence d'arbuscules denses typiques de *Glomus versiforme* (Fig. 99).

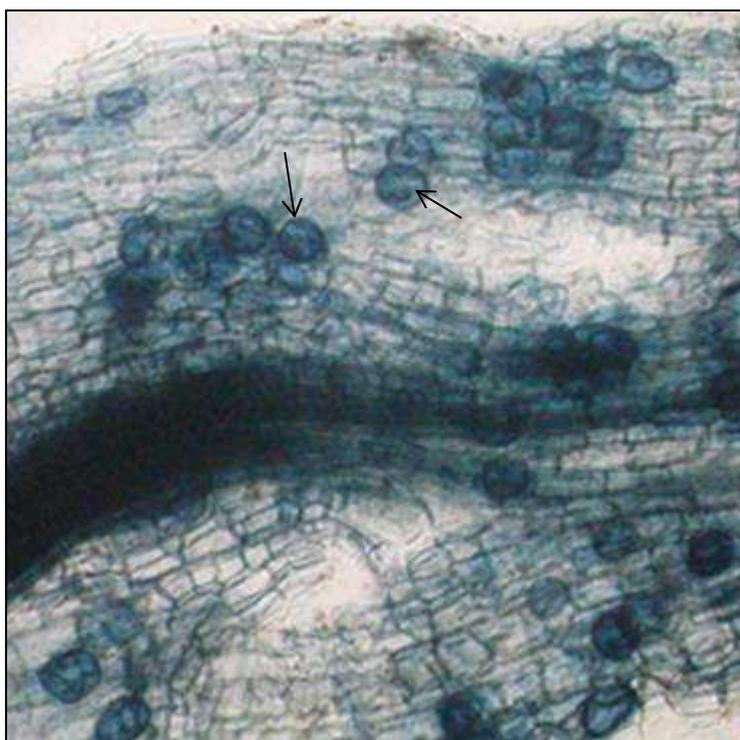


Fig. 98 : vésicules ovales intercellulaires (flèches) caractéristiques du genre *Glomus* ( $\times 100$ ).

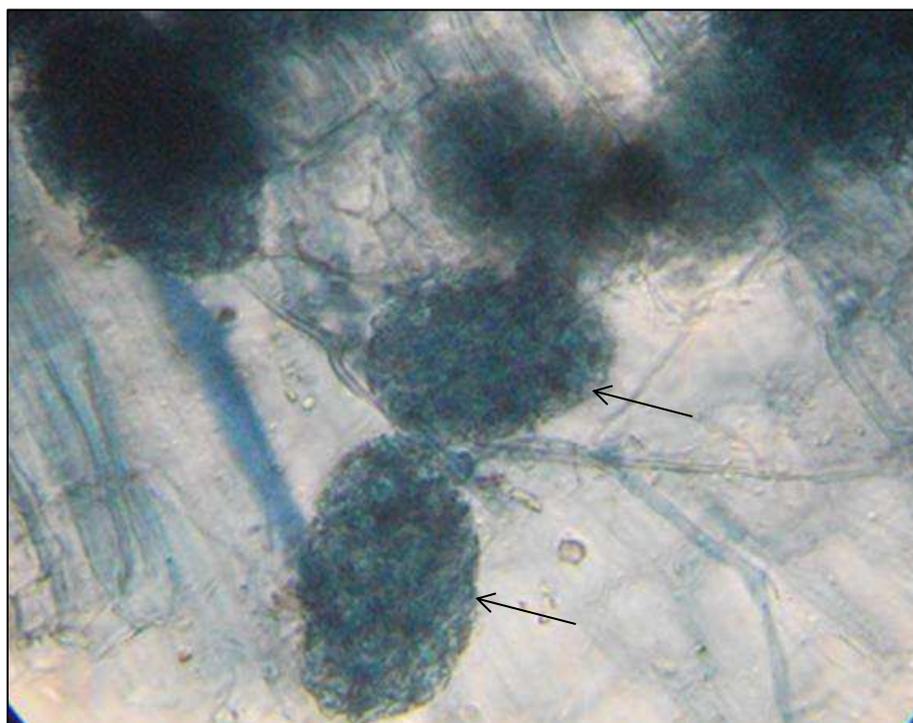


Fig. 99 : arbuscules denses (flèches) typique de *Glomus versiforme* ( $\times 400$ ).

b. Le genre *Acaulospora* : reconnu grâce à leurs vésicules rectangulaires à paroi fine (Fig.100).

Par ailleurs, nous n'avons retrouvé dans les échantillons examinés que le type morphologiques « *Arum* » (Fig.100), nous n'avons pas observé de type « *Paris* ».

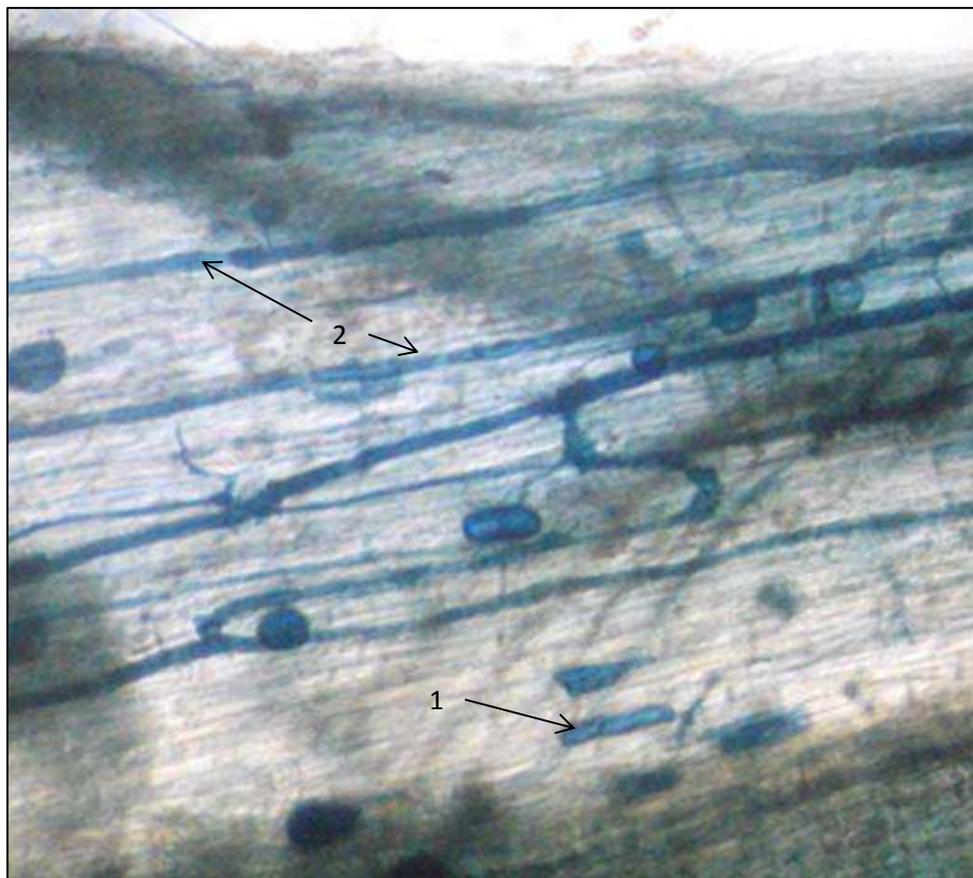


Fig. 100 : vésicules caractéristiques du genre *Acaulospora* (1) et hyphes intercellulaires du type « *Arum* » (2) (×100).

## 1.2. Endophytes septés

Les échantillons observés ont montré une richesse en structures endophytiques. En effet, nous avons rencontré des hyphes marron septés, portant des microsclérotés matures de couleur également marron, occupant les milieux intracellulaires de certaines cellules du cortex racinaire (Fig. 101 et Fig. 102). Par ailleurs des échantillons de racines ont montré des microsclérotés immatures colorés au bleu trypan et occupant le milieu intracellulaire de quelques cellules du cortex racinaire (Fig.103).

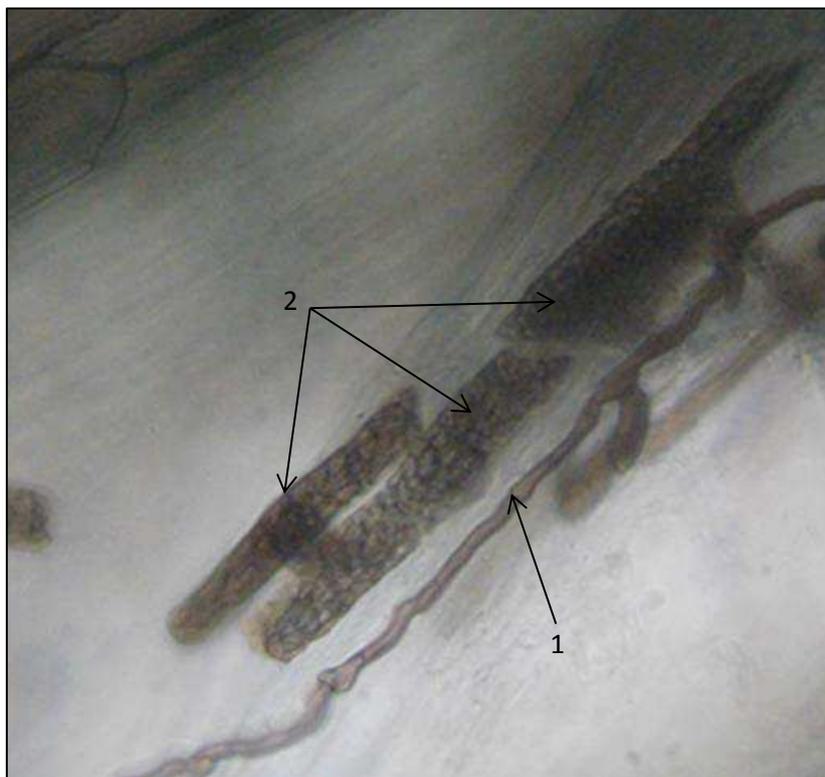


Fig. 101 : hyphe septé (1) et microscélérotés matures pigmentées en marron (2) de DSE ( $\times 100$ ).

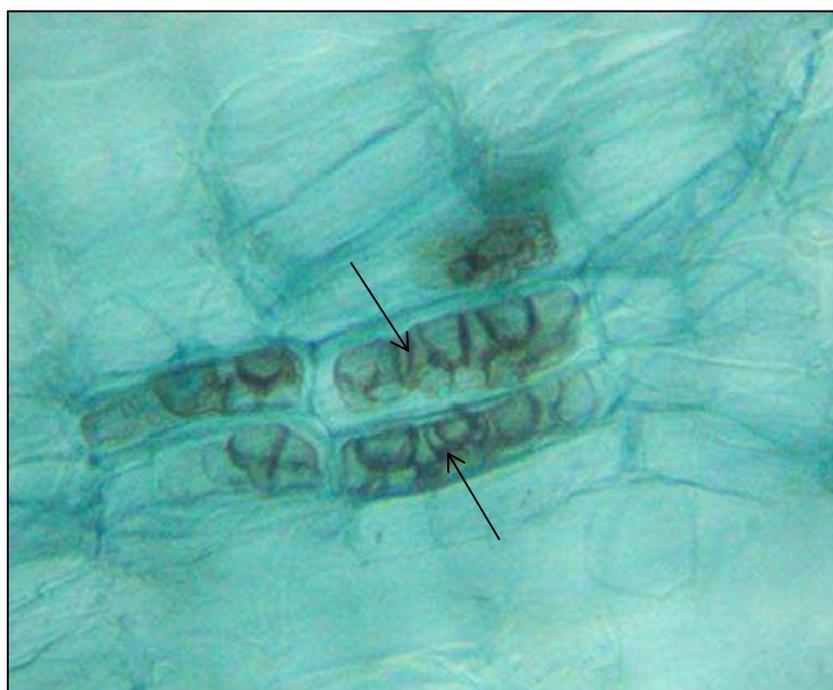


Fig. 102 : microscélérotés matures pigmentées en marron (flèches) occupant le milieu intracellulaire de certaines cellules du cortex racinaire ( $\times 400$ ).

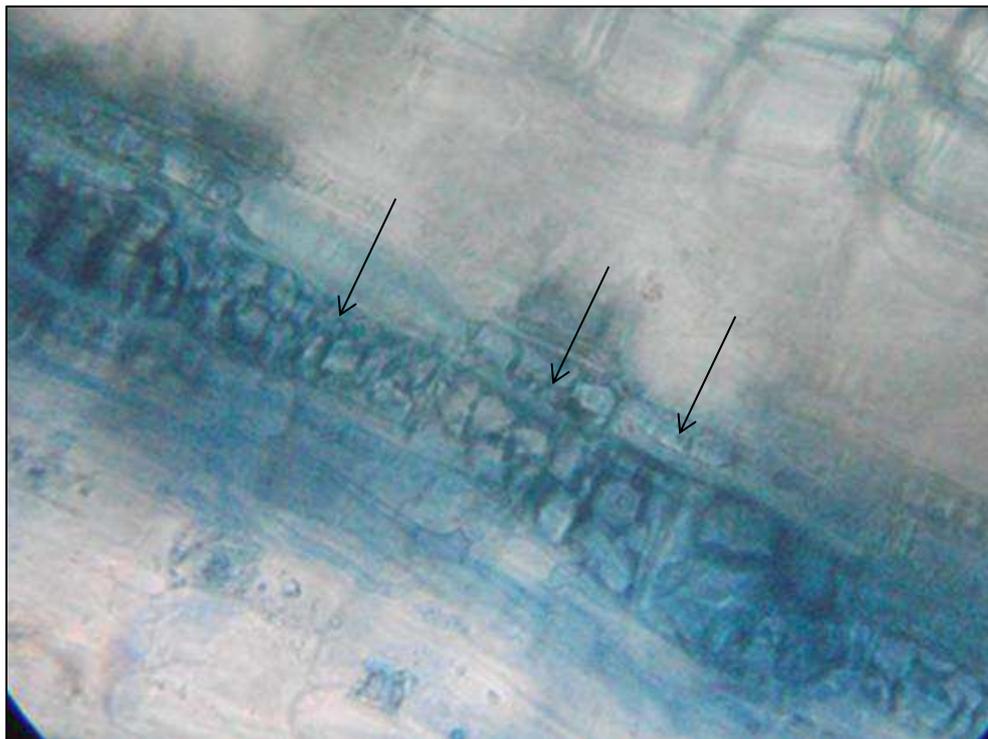


Fig. 103 : microsclérotés immatures (flèches) de DSE occupant le milieu intracellulaire de certaines cellules du cortex racinaire ( $\times 400$ ).

## 2. Discussion

Malgré les conditions d'aridité de cette région (bioclimat à la limite de l'aride et du saharien tempéré avec seulement 110.29 mm de pluie par an), la daya montre un paysage d'îlot de biodiversité (voir Fig.26 et Fig.27) au milieu d'étendues arides. Le diamètre de ladite daya étant réduit et étant loin de tout, elle est de ce fait désolément non rentable du point de vue agricole. En effet, les sols de cette daya sont à l'abri de tout labour. Dès lors et dans ces conditions de stabilité, on s'attendrait à une richesse générique conséquente. Cependant les échantillons examinés n'ont montré que deux genres de VAM.

Nous avons observé des arbuscules, preuve d'activité mycorhizienne. La période choisie pour l'échantillonnage est donc appropriée et coïncide avec le mois d'avril pour cette population.

Cependant les travaux de Mechiah (2015) sur la population de pistachier de l'Atlas de la daya d'el Gouffa située dans la même région que la daya de Lekhneg (Laghouat) ont montré une forte biodiversité sporale dans les sols rhizosphérique du pistachier de l'Atlas. Parmi les

cinq genres identifiés, le genre *Acaulospora* est le plus abondant avec 45%, suivi par le genre *Glomus* avec 18,18%. Les genres *Gigaspora* et *Scutellospora* sont moyennement présents (7,43% et 3,85% respectivement) et enfin le genre *Ambispora* faiblement présent (3%). Les genres non identifiés pendant cette étude constituent 22,54%, ce qui démontre une richesse spécifique qui reste à découvrir chez cette espèce.

Les différences entre nos résultats et ceux de Mechiah (2015) peuvent faire l'objet de recherches pertinentes conduisant entre autre à des études comparatives entre les dayas d'une même région (et autres) et déterminer ainsi quels sont les facteurs abiotiques (et/ou biotiques) qui favorisent (et/ou défavorisent) la biodiversité des genres impliqués dans les symbioses racinaires. L'approche pourrait porter argument dans les phénomènes d'isolement qui favorisent les processus de spéciation ainsi que proposé par les partisans des théories « biogéographiques » et de « l'écologie du paysage<sup>5</sup> ». Selon cette approche, le phénomène d'insularité écologique (les dayas ici constituent les équivalents-îles) influencent la dynamique des populations candidates à l'installation et à la pérennité (MacArthur et Wilson, 1967 ; Whittaker et *al.*, 2008). Selon cette approche, plus les îles sont petites et isolées moins les espèces qui y sont isolées ont de chance de survie à long terme, car soumises aux risques de dérive génétiques et autres actions délétères de la « consanguinité ».

La superficie de la daya d'el Gouffa est de 138.820,57 m<sup>2</sup> (Hamitouche, 2016) alors que celle de Lekhneg est de seulement 22.335,56 m<sup>2</sup> donc 6 fois plus petite. Ne serait-ce qu'à considérer ce paramètre, la différence de richesse spécifique des espèces fongiques associées aux racines du pistachier de l'Atlas dans les deux populations peut trouver une corrélation en adéquation avec l'approche proposée précédemment. Plus la surface de la daya est importante plus la richesse spécifique l'est aussi. Un sujet qui intégrera l'évolution des dayas tel proposé par Taibi et *al.* (1999) et leurs statut mycorhizien (et endophytique) serai aussi original que pertinent.

Les échantillons examinés n'ont montré que le type morphologique « *Arum* ». Nous n'y avons point observé de type « *Paris* ». Comme déjà discuté plus haut, le type « *Arum* » se développe plus rapidement que le deuxième type. Dans ces régions arides, les périodes de disponibilité relative en eau et des températures clémentes sont très réduites, dès lors la daya offre un milieu exceptionnel en fournissant une plus-value hydrique, par un « effet entonnoir » en cumulant les eaux des rares pluies et par effet de rétention d'eau grâce

---

<sup>5</sup> Landscape ecology

aux sols fins qui la constitue. Nous pensons que le pistachier de l'Atlas qui y végète, développe un parenchyme cortical « aéré », avec des espaces intercellulaires conséquents, d'une part pour faire face aux inondations momentanées de la daya et s'assure ainsi l'oxygénation de ses racines, mais d'autre part privilégie le type « *Arum* » qui trouvera ainsi la voie pour une installation rapide de la mycorhize et ainsi une rentabilité aussi rapide de cette symbiose salubre.

Presque toutes les racines sont infectées par des champignons endophytes foncé septés (DSE). Les travaux de Mechia (2015) dans la daya d'el Gouffa ont montré que toutes les racelles des pistachiers de l'Atlas échantillonnés étaient infectées par des endophytes foncé septés (DSE) et en quantité très importante et que ces résultats étaient similaires à ceux de Hadj Benamane et Ould Amrouche (2009), Raab (2010) et Redjda (2010).

La richesse de la population de la daya de Lekhneg en endophytes racinaires montre un intérêt certain de cette population à augmenter l'investissement dans ce type de relations. Bien que mal connus, il est rapporté que les champignons endophytes ont un réel rôle de protection des plantes hôtes contre les pathogènes potentiels (Mandyam et Jumpponen 2005). Il est d'autant plus probable, car la population échantillonnée végète dans une daya isolée dans une contrée aride, et subissant les assauts de candidats aussi diverses que décidés. La compétition certaine qui s'engage avantagera les stratégies les plus efficaces, la symbiose dans ce cas, et pourquoi pas avec des endophytes fongiques qui repousseront les pathogènes potentiels ?

Du point de vue écologique, il se peut qu'on assiste dans ces environnements à une forme de vicariance des endophytes racinaires à la place (ou en complément) des VAM et qu'ils seraient plus performants en termes d'augmentation de la valeur sélective que ne le seraient les VAM.

En effet des études suggèrent leur rôle complémentaire de celui des VAM. Ces études ont montré leurs rôles de facilitation par l'amélioration de l'acquisition des nutriments par la plante hôte, dans la production de métabolites inhibiteurs des agents pathogènes ; d'autres suggèrent la possible implication des endophytes fongiques dans l'utilisation des ressources organiques (Mandyam et Jumpponen, 2005).

## D. La population de Béni Ounif (Béchar)

### 1. Résultats

Toutes les racines examinées n'ont montré ni ectomycorhizes ni ectendomycorhizes. Par contre, elles sont endomycorhizées présentant une richesse substantielle en structures fongiques endophytiques à différents stades de maturation.

#### 1.1. Endomycorhizes à arbuscules (VAM)

Nous n'avons pu identifier qu'un genre de champignon VAM, il s'agit du genre *Glomus* reconnu grâce à ses hyphes intercellulaires se ramifiant en « Y » et ses vésicules ovales caractéristiques (Fig.104).

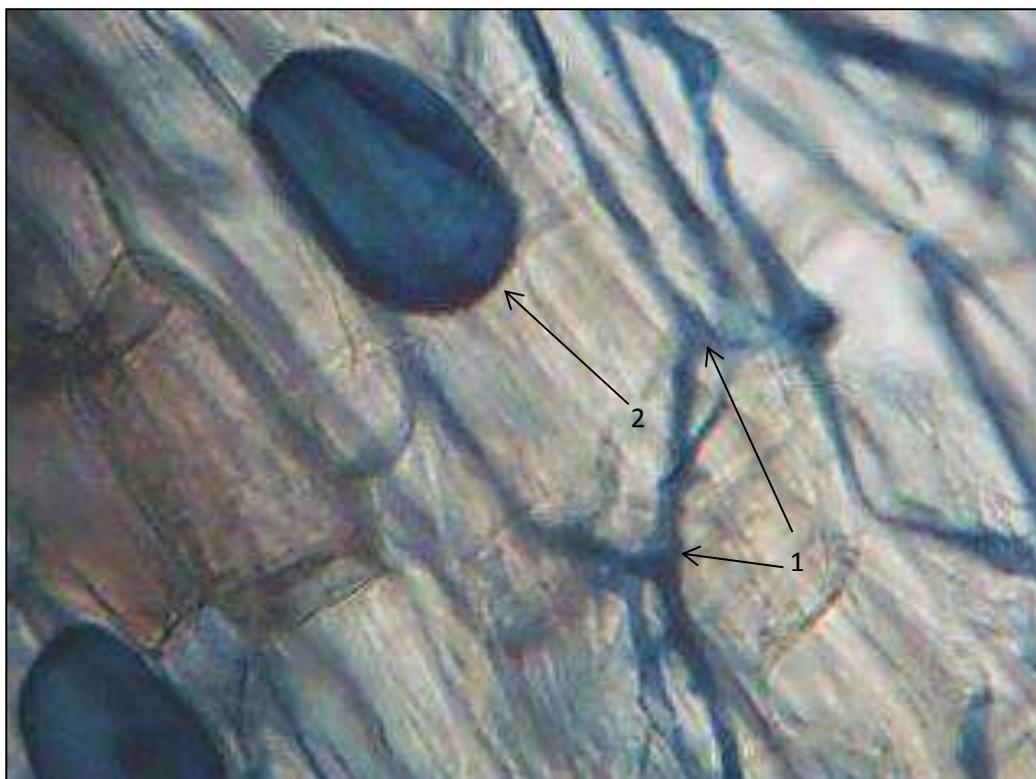


Fig. 104 : ramifications en « Y » des hyphes intercellulaires (1) et vésicule ovale intercellulaire (2) du genre *Glomus* (×400).

Des types morphologiques de VAM, nous n'avons observé que le type « *Arum* » (Fig.105), pas de type « *Paris* ».

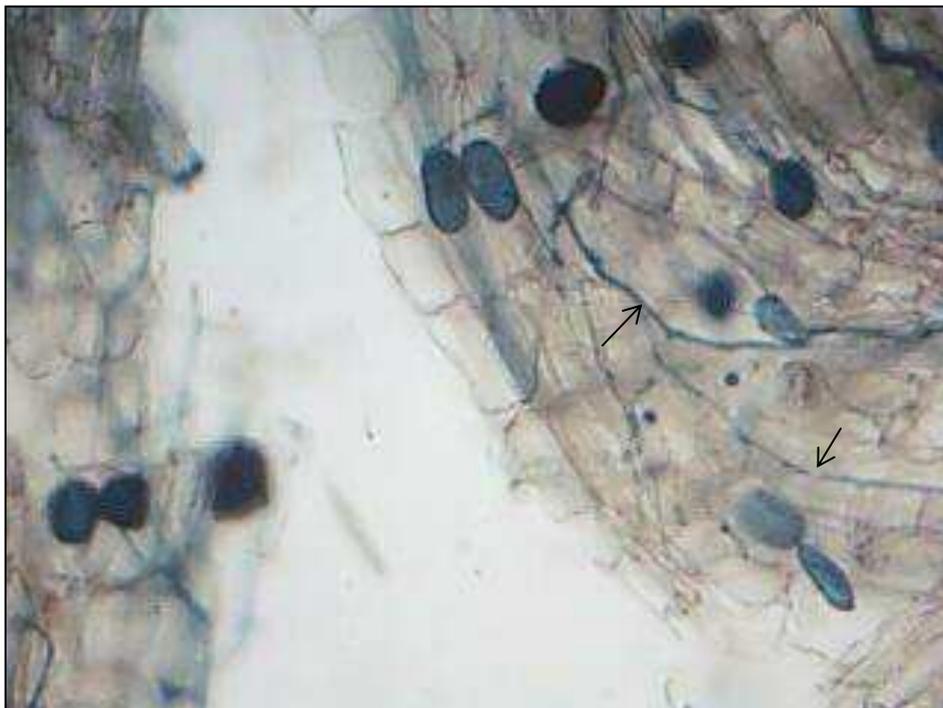


Fig. 105 : hyphes intercellulaires (flèches) du type « *Arum* » (×100).

Quant aux arbuscules, aucune racine observée n'en a présenté.

## 1.2. Endophytes septés

La plupart des racines examinées sont hérissées de poils absorbants et sont infectées par des champignons endophytes. Nous avons pu observer les structures caractéristiques d'hyphes marron septés de ce type de champignon (Fig. 106 et Fig. 107) et une richesse claire en microsclérotés matures et celles en voie de maturation (Fig. 108 et Fig. 109).

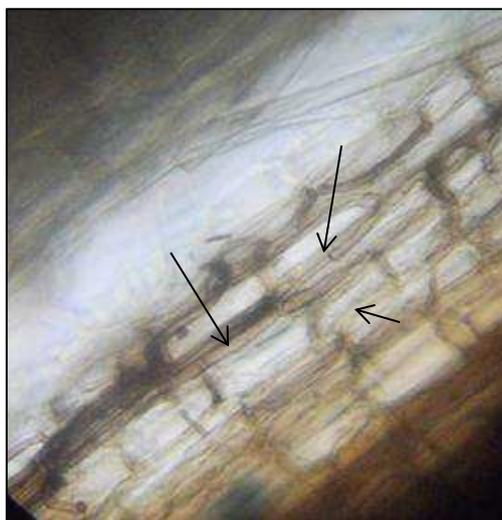


Fig. 106 : hyphes marron septés (flèches) de DSE à la surface de la racine (×100).

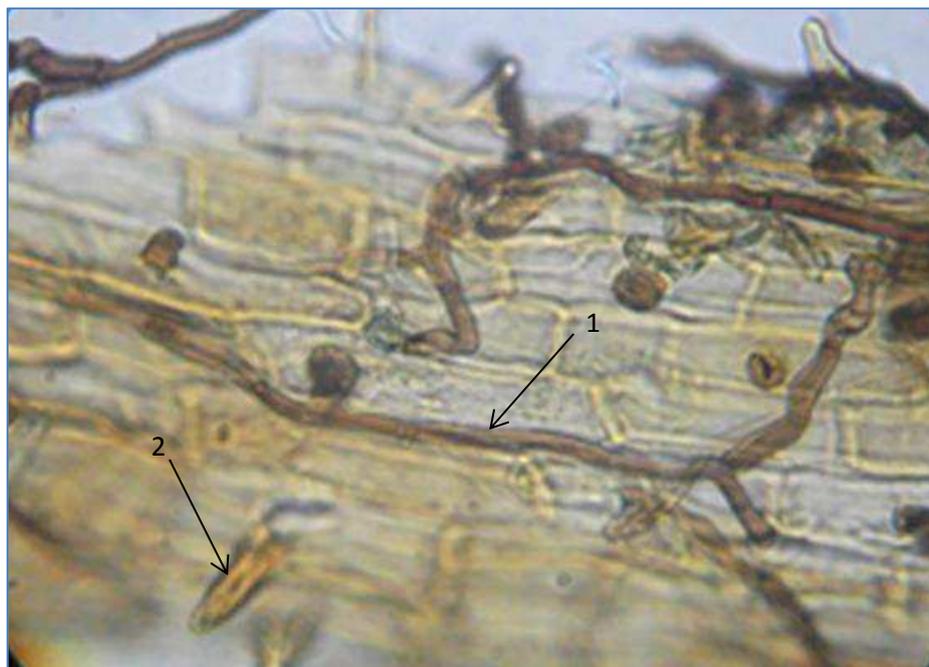


Fig. 107 : hyphes marron septés (1) de DSE parcourant la surface de la racine hérissée de poils absorbants (2) ( $\times 100$ ).

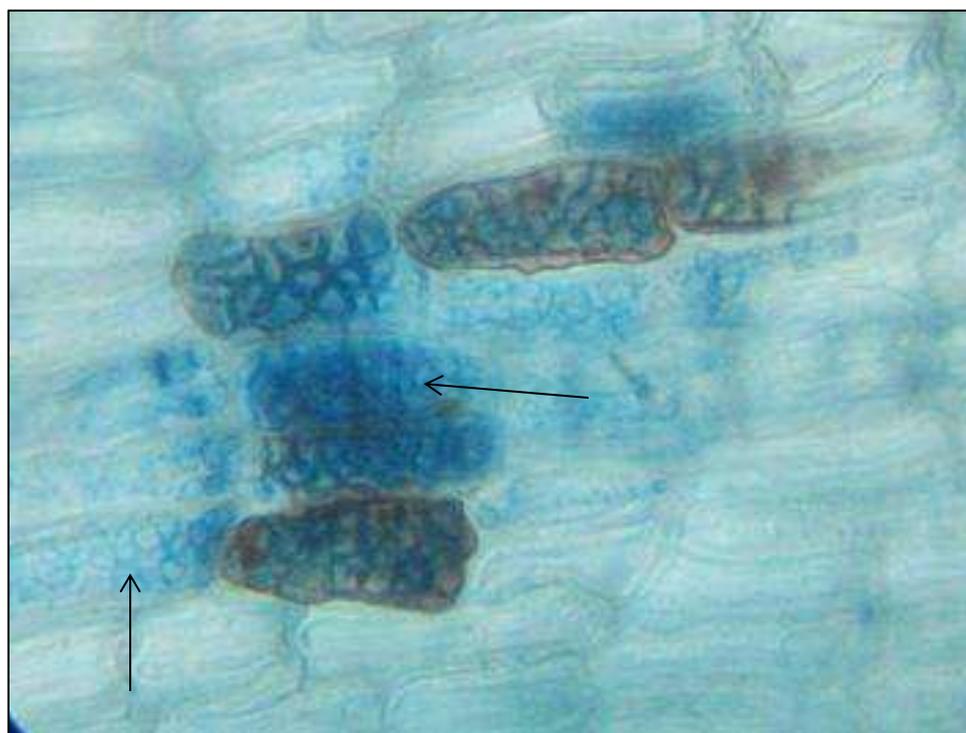


Fig. 108 : microclérotés en maturation (flèches) dans les cellules du cortex racinaire ( $\times 400$ ).

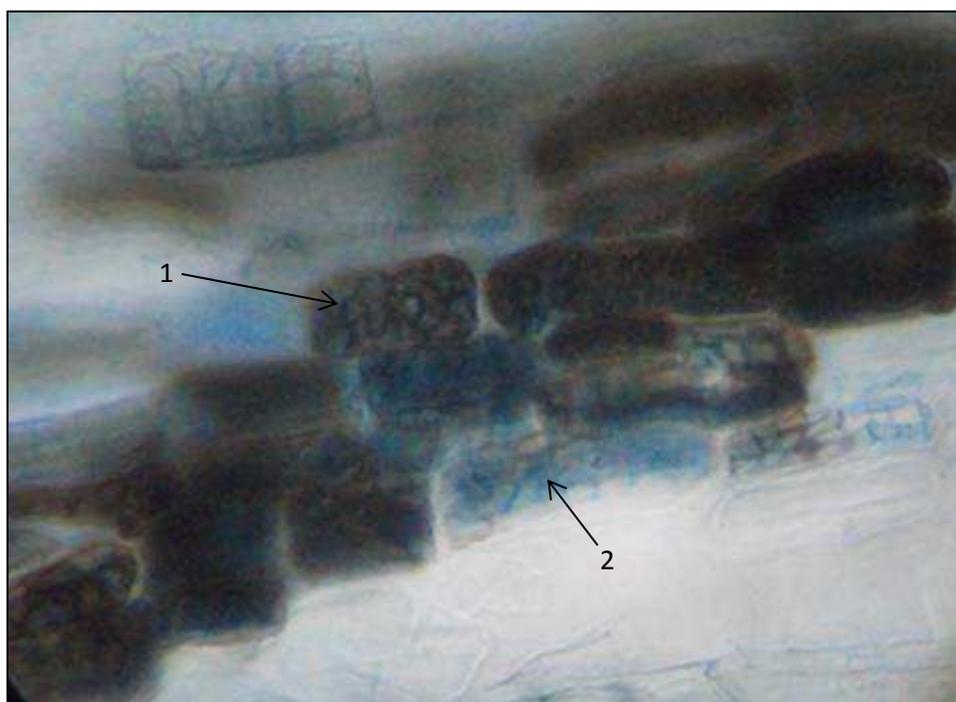


Fig. 109 : microscélérotés matures (1) et en voie de maturation (2) dans les cellules du cortex racinaire ( $\times 100$ ).

## 2. Discussion

Les racines des pistachiers de l'Atlas échantillonnés à Béni Ounif n'ont montré qu'un seul genre de VAM. Il s'agit du genre *Glomus*, ce qui confirme le caractère ubiquiste de ce genre parmi les VAM (Strullu, 1990 ; Schwarzott, 2001). Il n'est donc pas étonnant de le rencontrer même dans ces biotopes à climat hyperaride. Cependant, l'absence d'autres genres tels ceux retrouvés chez les autres populations sous d'autres latitudes, peut s'expliquer, en plus des réserves émises précédemment, par la dynamique du substrat qui constitue le sol sous pistachier de l'Atlas échantillonnés. En effet, il s'agit d'un lit d'oued sujet à des torrents saisonniers, qui restructurent ces sols d'apport secondaires et perturbent l'installation des autres genres de VAM plus exigeants tel les *Scutellospora* et autres *Acaulospora*.

La présence du type morphologique « *Arum* » uniquement peut s'expliquer comme fait précédemment (avec la population de Lekhneg), par la probable efficacité de ce type dans ces biotopes contraignants et indigents. Les conditions relatives optimales de croissance n'étant réunies que pendant une courte saison, les jeunes racines du pistachier expriment une histologie aérée du parenchyme cortical, favorisant le type « *Arum* ». Ainsi, la colonisation se faisant rapidement, la mycorhize devient ainsi très vite fonctionnelle et rentable.

Nous n'avons pas observé d'arbuscules, ainsi (et en plus des hypothèses avancées plus haut (cf. p 206, § 2) et qui restent valables dans ce cas aussi), nous déduisons que probablement l'échantillonnage n'a pas été fait à la bonne période pour cette population (en l'occurrence le mois de mars).

Inversement, nous constatons que les endophytes racinaires tendent à être les plus fréquents comparés aux VAM. En effet, leur présence accrue montre indirectement qu'ils sont importants pour l'hôte dans ces biotopes, peut-être plus que ne le sont les VAM ?

Ecologiquement, il se peut qu'ils jouent le rôle de vicaire (des VAM), et que dans ces milieux indigents, leurs apports sont peut-être plus intéressants en terme de valeur sélective que ne le procureraient les VAM. Des études suggèrent leur rôle complémentaire de celui des VAM, notamment par leurs rôles de facilitation par l'amélioration de l'acquisition des nutriments par la plante hôte, dans la production de métabolites inhibiteurs des agents pathogènes ; et leur possible implication dans l'utilisation des ressources organiques (Mandyam et Jumpponen, 2005).

### **Volet II : Approche inter-populationnelle**

Le tableau 58 résume les résultats obtenus dans les quatre stations.

Evidemment, nous consentons que toute comparaison scientifique doit se faire selon des règles statistiques rigoureuses, et qu'il n'y a de résultats significatifs (ou non d'ailleurs) que ceux appuyés par les tests adéquats. Cependant, nous rappelons qu'au départ, cette partie de la thèse se voulait une exploration des genres de VAM et d'endophytes racinaires chez le pistachier de l'Atlas le long d'un gradient d'aridité croissante. Mais, à la vue des résultats obtenus et ainsi présenté, nous nous sommes aventurés à faire une comparaison entre les stations étudiées, les conclusions seront d'autant plus sujettes à d'autres études qui investiront dans leur vérification.

Ainsi, et selon les populations étudiées, nous apparaît clairement que plus l'aridité (climatique et édaphique) augmente, plus :

1. la diversité générique des VAM au niveau des racines diminue ;
2. le type morphologique « *Paris* » disparaît alors que le type « *Arum* » perdure ;
3. le nombre de racines colonisées par les endophytes racinaires augmente.

Quant à la diversité des VAM, nous consentons que le protocole d'identification utilisé lors de ces travaux a ses limites et que la diversité réelle ne peut s'estimer que par les spores dans le sol.

Tableau 58 : genres, types morphologiques des VAM et endophytes racinaires observés dans les quatre populations étudiées.

Population	n (sujets)	Genres de VAM identifiés			Type morphologique de VAM		Endophytes fongiques racinaires
		<i>Glomus</i>	<i>Acaulospora</i>	<i>Scutellospora</i>	<i>Arum</i>	<i>Paris</i>	
Sidi Naamane (Médéa)	8	+	+	+	+	+	+
el Mergueb (M'sila)	7	+	+	+	+	+	+
Lekhneg (Laghouat)	6	+	+	0	+	0	++
Béni Ounif (Béchar)	6	+	0	0	+	0	+++

+ : présence ; 0 : absence.

Selon la présence ou l'absence des arbuscules (indicateurs d'activité mycorhizienne), nous avons considéré que la période d'échantillonnage des populations de Sidi Naamane et de Béni Ounif n'était pas appropriée et ce, malgré la présence de structures mycorhiziennes (hyphes et vésicules). Si cela se vérifie (d'où la nécessité de travaux complémentaires), cette comparaison se rediscuterait autrement.

Ces réserves émises, nous considérons que cette régression de la diversité générique est liée aux conditions édapho-climatiques des populations étudiées. En effet, ces conditions « s'aridifient » *crescendo*, imposant ainsi une sélection drastique des genres candidats à la mycorhization. Seules les souches les plus résistantes (les moins exigeantes) sont sélectionnées, en l'occurrence le genre *Glomus*, connu (et reconnu) pour son ubiquité. Les autres genres, peut-être plus sensibles, ou plus exigeants, ou encore moins intéressants pour l'hôte sont éliminés *de facto*.

Il faut par ailleurs rappeler, que cette symbiose est un état relationnel qui s'inscrit dans un continuum mutualisme-parasitisme, la plante hôte sélectionne naturellement les genres les

plus rentables en fonction des conditions, s'inscrivant ainsi dans une logique propre à la fameuse « global foraging theory » basée essentiellement sur le ratio « coût / bénéfice ».

Les types morphologiques (*Arum* et *Paris*) s'installent suite à une coordination entre l'hôte et le symbiote. Des conditions édapho-climatiques dépend le type sélectionné. Ainsi, quand les conditions sont favorisées saisonnièrement par une pluviométrie et une température relativement clémentes (cas de Sidi Naamane et d'el Mergueb), nous supposons que les conditions locales propres à chaque sujet (peut-être même à chaque racine) déterminent le type à installer. Ainsi, et ayant trouvé les deux types dans les deux populations sus citées, nous supposons que les conditions de leurs formation sont présentes (et peuvent faire l'objet d'une recherche pertinente). Mais quand ces conditions sont contraignantes tout le long de l'année (cas de Lekhneg et de Béni Ounif), la priorité est au type « *Arum* ». En effet, il est plus rapide à installer et ainsi la mycorhization est fonctionnelle et productive dans des délais vraisemblablement plus courts. La plante (et le symbiote) optimisent ainsi les saisons favorables très courtes de ces régions.

Cependant, et inversement, nous assistons à une augmentation du nombre de racines colonisées par les endophytes (DSE). En effet, Read et Haselwandter (1981) ont rapporté suite aux résultats obtenus lors de leurs études sur les DSE, qu'ils étaient plus prévalent que les VAM dans les environnements stressés. Ils sont plus abondants qu'ils ne paraissent, car leur observation est difficile. Haselwandter and Read (1982), Newsham (1999) et Yu *et al.*, (2001) ont rapporté que des filaments non mélanisés, hyalins sont produits par ces champignons dans la plante hôte. Ainsi, ils passent inaperçus à l'observation microscopique causant une sous-estimation de leurs réelle abondance. Cette prévalence signifie qu'ils ont d'importantes fonctions (bien que mal connues) dans les écosystèmes (Mandyam et Jumpponen, 2005).

Parmi les rôles probables des DSE, et en plus des fonctions mycorhiziennes d'amélioration de l'acquisition des nutriments par la plante hôte ; il se peut qu'ils participent à la protection contre les pathogènes telluriques et/ou les herbivores par le biais de métabolites (Mandyam et Jumpponen, 2005). Effectivement, les champignons DSE produisent de grandes quantités de mélanine dans leurs parois cellulaires. Les mélanines sont connues pour conférer de la rigidité aux parois cellulaires, de la résistance aux microbes et une protection contre la dessiccation et les dommages liés aux radiations (Kuo et Alexander 1967 ; Bell et Heeler 1986 ; Griffith 1994). Redman *et al.* (2002) ont montré que les endophytes fongiques augmentent la thermo-tolérance chez les plantes hôtes. Les mécanismes qui permettent la tolérance dans les environnements altérés, sont au stade d'hypothèse. Les endophytes lors de leur colonisation des plantes hôtes, produisent des parois cellulaires mélanisées, Redman et

*al.*, (2002) suggèrent que la mélanine fongique pourrait jouer le rôle de dissipateur de chaleur ou pourrait former des complexes avec les radicaux libres formés durant le stress. Si cela se confirmait, les DSE qui produisent des hyphes et des microsclérotés mélanisés et qui sont abondants dans les environnements stressés, pourraient jouer des fonctions similaires qui devraient être essentielles pour la survie et la croissance des plantes dans ces environnements (Mandyam et Jumpponen, 2005).

Barrow et Osuna (2002) suggèrent que la fonction des DSE peut être plus complexe qu'une simple amélioration pour la plante de la recherche des nutriments dans les solutions de sol ; par exemple, l'utilisation des sources de matières organiques est l'un des domaines où les DSE pourraient compléter les fonctions des champignons mycorhiziens.

A la lumière de ce qui précède, nous comprenons pourquoi les racines du pistachier de l'Atlas recrutent de plus en plus de DSE avec l'aridité augmentant. Ce partenaire pourrait, à défaut d'être complémentaire des VAM surtout dans les milieux stressants, être plus performant et efficace dans la colonisation des environnements de plus en plus contraignants. Comme décrit par les auteurs, il pourrait protéger les racines contre les pathogènes et autres herbivores potentiels, améliorer leur thermo-résistance. Améliorer leur efficacité dans l'acquisition des ressources nutritives, surtout d'origine organique, d'autant plus que les sols sous pistachier de l'Atlas échantillonnés ont montré un isohumisme intéressant et exploitable potentiellement par ces champignons.

Chapitre V

# Conclusions et perspectives

Au terme de ces travaux à notre connaissance originaux, et à travers lesquels nous avons tenté d'approcher les réponses architecturales racinaires et les stratégies d'absorption hydrominérale chez *Pistacia atlantica* Desf. en fonction d'un gradient d'aridité croissante en Algérie, nous avons pu apporter des éléments de réponse étalés tout au long de cette thèse.

Du point de vue écophysiological, il est apparu que la flexibilité du système racinaire du pistachier de l'Atlas est l'un des atouts majeurs qui lui permettent d'avoir une telle amplitude écologique. En effet, il investit parcimonieusement sa biomasse racinaire en réaction aux conditions édapho-climatiques de son environnement. L'augmentation de l'aridité le long du gradient choisis accroît l'aridité édaphique, le pistachier de l'Atlas cible alors des biotopes particuliers qui lui offrent des conditions édaphiques pourvoyeuses potentiellement en eau, grâce à leurs textures et structures particulières (daya et lits d'oueds).

Nous avons constaté que quand les conditions climatiques et édaphiques étaient favorables à une bonne capacité de rétention en eau des niveaux superficiels, cas des sols septentrionaux relativement les plus évolués du transect, près de 90% de son système racinaire est majoritairement superficiel, plus facile à installer et moins coûteux en termes d'énergie et de carbone. L'aridité augmentant, les sols évoluent vers des textures de plus en plus grossières, moins rétentrices en eau ; cette eau percolant facilement vers les profondeurs, le pistachier de l'Atlas reconfigure dès lors son architecture racinaire, en allouant jusqu'à près de 40% vers les niveaux profonds qui forment des réservoirs en eau à l'abri de l'évaporation, auxquels sont soumis implacablement les niveaux de surface. On assiste dès lors à l'évolution du système racinaire vers une configuration spatiale de type généralisé.

Le tableau 59 (annexe 4) rassemble les moyennes des principales variables racinaires et édaphiques des quatre populations. La figure 110 (annexe 5) est le graphe inhérent audit tableau après une logtransformation pour une pondération qui nous permet une meilleure visibilité. La figure 111 (annexe 6) est un synoptique qui illustre les résultats obtenus tout au long de ces travaux.

Le pouvoir adaptatif de son système racinaire ne semble lié ni à l'âge ni au sexe, il ne paraît dépendre que des conditions édapho-climatiques de l'environnement qu'il s'apprête à coloniser. Ainsi, nous trouvons des jeunes et des adultes (mâles et femelles) ayant des systèmes racinaires aussi différents que ne le sont les systèmes racinaires superficiels et ceux généralisés

La facilitation semble être un des garants d'une survie réussie du pistachier de l'Atlas. En effet, la plante nurse devenue emblématique du pistachier de l'Atlas, en l'occurrence *Zizyphus lotus* que nous avons retrouvé dans toutes les stations échantillonnées, procure à son jeune protégé les conditions de sa germination. Ceci dit, et à cette relation interspécifique, il faut ajouter une autre source de facilitation, mais cette fois-ci intra-spécifique. En effet, nous avons constaté que dans les biotopes extrêmes comme celui de Béni Ounif, les individus de cette population sont interconnectés par un réseau d'anastomoses pour former une espèce d'entité solidaire, une forme de « super-individu » qui fera face plus efficacement aux conditions d'indigences édapho-climatiques (et autres). Les individus mutualisent leurs différentes compétences génétiques et arrivent ainsi à augmenter leurs valeurs sélectives respectives. En effet, dans le cas de la population de Béni Ounif, les individus disposant de racines profondes prospectent les niveaux profonds humides, il est probable que le surplus soit redistribué aux pistachiers connectés, qui n'ont pas développés de racines profondes ou bien n'ont pas accès à des humidités en profondeur malgré leurs racines profondes.

A ce qui précède, et sous la même approche systémique, s'ajoute la symbiose racinaire avec en même temps les champignons endomycorhiziens (VAM) et les endophytes fongiques (DSE), tous deux retrouvés dans les racines des populations échantillonnées le long du gradient d'aridité croissante.

Les résultats des observations ont montré qu'apparemment la richesse spécifique en VAM des racines échantillonnées diminue avec l'augmentation de l'aridité édapho-climatique, alors qu'inversement, la richesse en DSE (quantitative et/ou qualitative ?) augmente.

Apparemment, les individus et selon les biotopes dans lesquels ils végètent, sélectionnent les souches de VAM et de DSE les plus performantes et qui augmenteraient d'une façon optimale leurs valeurs sélectives. Il semblerait que les DSE soient les plus favorisés par le pistachier de l'Atlas pour réussir la colonisation des environnements hyperarides. Des auteurs suggèrent la possible implication des endophytes fongiques dans l'utilisation des ressources organiques (Mandyam et Jumpponen, 2005). En effet, comme décrit par ces auteurs, ils pourraient protéger les racines contre les pathogènes et autres herbivores potentiels, améliorer leur thermo-résistance. Améliorer leur efficacité dans l'acquisition des ressources nutritives, surtout d'origine organique, d'autant plus que les sols sous pistachier de l'Atlas échantillonnés ont montré un isohumisme intéressant et exploitable potentiellement par ces champignons.

Le philosophe Francis Bacon<sup>1</sup> disait : « Si on commence avec des certitudes on finit avec des doutes ; si on commence avec des doutes on finit avec des certitudes ». Dans le cas des recherches scientifiques, on commence certes avec des questionnements, mais au final et à quelques réponses obtenues, viennent se greffer plus de questions qu'on en a posé au commencement.

En effet, beaucoup de sujets de recherches en perspectives sont soulevés par ces travaux et qui permettront d'apprendre de cette espèce comment elle optimise son développement dans les conditions d'aridité, par ailleurs en voie de globalisation. Nous proposons celles qui nous paraissent les plus pertinentes :

- Voies de facilitation du *Ziziphus lotus* dans le succès de l'installation du pistachier de l'Atlas le long d'un gradient d'aridité croissant ;
- comparaison des histologies des racines superficielles et des racines profondes chez le pistachier de l'Atlas et les facteurs biotiques et abiotiques déterminants ;
- histologie des anastomoses racinaires chez le pistachier de l'Atlas et facteurs favorisants ;
- étude des flux de matières (eau, minéraux et carbone) entre les individus d'une même population de pistachier de l'Atlas par voie d'anastomoses racinaires ;
- métabolites secondaires secrétés (ou stockés) dans les racines du pistachier de l'Atlas ;
- évolution des dayas et du statut mycorhizien (et endophytique) des populations de pistachier de l'Atlas qui y végètent ;
- saisons d'échantillonnage propice pour les populations de pistachier de l'Atlas en vue de l'étude de ses VAM et ses DSE associés ;
- relation entre type morphologique *Arum* et *Paris* des VAM chez le pistachier de l'Atlas en fonction des biotopes colonisés ;
- identification des VAM associés au pistachier de l'Atlas par le biais des spores ;
- identification par voie de méthodes moléculaires des VAM et DSE associés au pistachier de l'Atlas ;
- évolution des richesses spécifiques en VAM et en DSE chez le pistachier de l'Atlas le long d'un gradient d'aridité croissant.

C'est dire, avec toute l'humilité qui s'impose, que beaucoup reste à apprendre de cette ressource naturelle.

---

<sup>1</sup> Scientifique et philosophe Anglais.





# **Références bibliographiques**

## A

1. **Abbott L.K., 1982.** Comparative anatomy of vesicular-arbuscular mycorrhizas formed on subterranean clover. *Australian Journal of Botany*. 30: 485-499.
2. **Abdelkrim H., 1986.** Les dayates de l'Atlas saharien (Algérie). Colloque phytosociologie végétale et géomorphologie, Bailleul : 361-371. Eds. Cramer Stuttgart.
3. **Abdelkrim H., 1992.** Un joyau floristique : l'Oued idikel ; Oued à *Pistacia atlantica* et à *Myrtus nivellei* dans le Hoggar. *Doc. Phytosociologie .N.S., XIV* : 211-218. Camerio.
4. **Abdous O., 2010.** Approche de l'adaptation de l'architecture racinaire du pistachier de l'Atlas (*Pistacia atlantica* Desf) à la sécheresse : cas des populations de Theniet El Had (Tissemsilt) et de la daya de Tilhremt (Laghouat). Mémoire d'ingénieur Agronome, Département des Sciences Agronomiques, Université Mouloud Mammeri, Tizi Ouzou 132 p.
5. **Adiku S.G.K., Rose, C.W., Braddock, R.D. and Ozier-Lafontaine H., 2000.** On the simulation of root water extraction: examination of minimum energy hypothesis. *Soil Sci* 165: 226–236.
6. **Ait Radi A., 1979.** Multiplication par voie végétative et par semis de *Pistacia atlantica* Desf. et de *Ailantus altissima*. Thèse Ingénieur, INA El Harrach, 40 p.
7. **Ait Saïd S., Fernandez C., Greff S., Derridj A., Gauquelin T. et Mevy J.P., 2011.** Inter-population variability of leaf morpho-anatomical and terpenoid patterns of *Pistacia atlantica* Desf. ssp. *atlantica* growing along an aridity gradient in Algeria. *Flora* 206: 397–405.
8. **Ait Slimane L., 2004.** Architecture racinaire et adaptation du pistachier de l'Atlas (*Pistacia atlantica* Desf. subsp. *atlantica*) à la sécheresse : cas de la population de Béni Ounif (Wilaya de Béchar). Mémoire d'ingénieur Agronome. Département des Sciences Agronomiques. Faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques. Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, Algérie. 107 p.
9. **Akiyama K., 2007.** Chemical identification and functional analysis of apocarotenoids involved in development of arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Bioscience, Biotechnology and biochemistry*, 71:6, 1405-1414.
10. **Aletà N., Ninot A., Rouskas D., Zakinthinos G., Avanzato D., Mendes Gaspar A., 1997.** La multiplication du pistachier. In : Germain E. (ed.). *Amélioration d'espèces à fruits à coque : noyer, amandier, pistachier*. Zaragoza : CIHEAM, 1997. p. 121-132.

(Options Méditerranéennes : Série B. Etudes et Recherches; n. 16).  
<http://om.ciheam.org/om/pdf/b16/97606104.pdf>

11. **Allen M.F., Allen B.E. and Friese C.F., 1989.** Responses of the non-mycotrophic plant *Salsola kali* to invasion by vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. *New Phytologist* 111: 45-49.
12. **Amroun R., 2013.** Caractérisation des propriétés physiques et chimiques des sols sous pistachier l'Atlas dans la daya de Timzerth (Wilaya de Laghouat). Mémoire d'ingénieur Agronome. Département des Sciences Agronomiques. Faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques. Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, Algérie.
13. **Anonyme 1, 1995.** Plan directeur d'Aménagement urbain de la ville de Laghouat. 7 p.
14. **Anonyme 2, 2010.** Secteur agricole, wilaya de Laghouat, 11 p.
15. **Anonyme 3, 2007.** Carte de diagnostic du réseau hydrographique de la wilaya de Laghouat. Bureau d'Etude Hydraulique et Génie Rural.
16. **Anonyme 4, 1998.** Présentation du secteur forestier de la wilaya de Laghouat, 33 p.
17. **Ansar M., 1996.** En plein cœur du Sahara, les arbres secrets des Touaregs. Syfia.84. [http://trentseptbis.free.fr/agadez.org/org/pages\\_culture/arbres.htm](http://trentseptbis.free.fr/agadez.org/org/pages_culture/arbres.htm).
18. **Aubert G., 1960.** Colloque général sur les problèmes de la zone aride. Les sols de la zone aride. UNESCO/NS/AZ/5/4. Colloque de Paris. Communication N°5. Paris.
19. **Aubert G., 1962.** Les sols des zones arides : Etude de leur formation, leurs caractères, de leur utilisation et de leur conservation – Actes du Colloque de Paris, UNESCO.
20. **Aubert G., 1978.** Méthodes d'Analyses des Sols. Marseille, France: Centre National de Documentation Pédologique.

---

**B**

---

21. **Bagnouls F. et Gausson H., 1953.** Saison sèche et indice xéothermique. *Bull Soc Hist Nat Toulouse* 88: 193–239.
22. **Baize D., 2000.** Guide des Analyses en Pédologie. 2<sup>ème</sup> Ed. Paris, France: INRA.
23. **Barrow J. R. and Aaltonen R.E., 2001.** A method of evaluating internal colonization of *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt. roots by dark septate fungi and how they are influenced by host physiological activity. *Mycorrhiza* 11: 199-205.
24. **Barrow J.R., and Osuna P., 2002.** Phosphorus solubilisation and uptake by Dark septate fungi in fourwing saltbush, *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt. *Journal of Arid Environments* 51 (3): 449-459.

25. **Belhadj S., 2001.** Les pistacheraies algériennes : état actuel et dégradation. Cahiers Options Méditerranéennes, 56: 107-109.
26. **Belhadj S., 2007.** Etude Eco-Botanique de *Pistacia atlantica* Desf. (Anacardiaceae) en Algérie, préalable à la conservation des ressources génétiques de l'espèce et à savoir sa valorisation. Thèse de Doctorat ès Sciences Agronomiques. Option Ecologie Végétale. Faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. Algérie. 183 p.
27. **Belhadj S., Derridj A., Aigouy T., Gers C., Gauquelin T. and Mevy J.P., 2007.** Comparative morphology of leaf epidermis in eight populations of atlas pistachio (*Pistacia atlantica* Desf. Anacardiaceae). Microsc Res Techniq 70: 837–846.
28. **Belhadj S., Derridj A., Auda Y., Gers C. et Gauquelin T., 2008.** Analyse de la variabilité morphologique chez huit populations spontanées de *Pistacia atlantica* en Algérie. Can J Botany 86: 520–532.
29. **Belharret O. et Rekkeb S., 2004.** Architecture racinaire et adaptation du pistachier de l'Atlas (*Pistacia atlantica* Desf. subsp. *atlantica*) à la sécheresse: cas de la population de Ain Oussera (Wilaya de Djelfa). Mémoire d'ingénieur Agronome. Département des Sciences Agronomiques. Faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques. Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, Algérie. 75 p.
30. **Bell A.A. and Wheeler M.H., 1986.** Biosynthesis and functions of fungal melanins. Annual Review of Phytopathology 24 : 411–451.
31. **Bell K.L., Hiatt H.D. and Niles W.E., 1979.** Seasonal changes in biomass allocation in eight winter annuals of the Mojave Desert. J Ecol 67 : 781-787.
32. **Benfoddil O., 2015.** Inventaire des champignons endophytes des feuilles de *Pistacia atlantica* Desf. de dayate El Guouffa (Laghout, Algérie). Mémoire de Magister. Faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques. Département des Sciences Biologiques. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie. 147 p.
33. **Benhassaini H., Mehdadi Z., Hamel L. et Belkhodja M., 2007.** Phytoécologie de *Pistacia atlantica* Desf. subsp. *atlantica* dans le nord-ouest Algérien. Sécheresse 18(3): 199-205.
34. **Bentaleb T., 2011.** Caractérisation physique et chimique des sols sous pistachier de l'Atlas (*Pistacia atlantica* Desf.) dans la daya de Boucédraia (wilaya de Djelfa). Mémoire Ing. Agronome. Département des Sciences Agronomiques. Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 62 p.

35. **Berish C. W. et Ewel J. J., 1988.** Root development in simple and complex tropical successional ecosystems. *Plant and Soil*, 106 (1):73-84.
36. **Berntson G.M., 1997.** Topological scaling and plant root system architecture: developmental and functional hierarchies. *New Phytologist* 135: 621–634.
37. **Birand H., 1959.** Relation entre le développement des racines et des parties aériennes chez certaines plantes xérophytes, et leur résistances à l'aridité. Projet majeur relatif aux recherches scientifiques sur les terres arides. Colloque de Madrid. Communication N°8.
38. **Blaszkowski J., 2012.** Glomeromycota. W. Szafer Institute of Botany Polish Academy of Sciences, Kraków, p. 304. ISBN: 978-83-89648-82-2
39. **Bonfante P. et Bianciotto V., 1995.** Saprotrophic versus symbiotic phase in endomycorrhizal fungi: morphology and cytology, *In* : Hodi B. and Varma A. (Eds.). *Mycorrhizas: molecular and biotechnology*, Springer-Verlag, Germany, pp. 229-247.
40. **Boubrima A., 2014.** Diversité architecturale du système racinaire du pistachier de l'Atlas en fonction du sol sous-jacent dans deux dayas de la région de Laghouat (Algérie) : dayate Saadi, Hassi Delâa et dayate Aïat, Timzerth. Mémoire de Magister. Faculté des Sciences. Département de Biologie. Université Amar Telidji, Laghouat, Algérie. 270 p.
41. **Bouillin J.P., 1986.** Le "bassin maghrebin"; une ancienne limite entre l'Europe et l'Afrique a l'ouest des Alpes. *Bulletin de la Société Géologique de France* II (4): 547-558.
42. **Bounceur D., 2009.** Contribution à l'étude des caractéristiques physiques et chimiques des sols sous pistachier de l'Atlas (*Pistacia atlantica* Desf. *subsp atlantica*) : cas de la daya de Tirlhemt (wilaya de Laghouat). Mémoire Ing. Agronome. Département des sciences agronomiques. Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 85 p.
43. **Breman H. and Kessler J.J., 1995.** Woody plants in agro-ecosystems of semi-arid regions with emphasis on the sahelian countries. *Advanced series in agricultural sciences* 23. Paris. Springer-Verlag, 340 p.
44. **Brundrett M.C. and Abbott L.K., 1991.** Roots of Jarrah Forest Plants .I. Mycorrhizal Associations of Shrubs and Herbaceous Plants. *Australian Journal of Botany* 39 (5): 445 – 457.

45. **Brundrett M.C., Bougher N., Dell B., Grove T. and Malajczuk N., 1996.** Working with Mycorrhizas in Forestry and Agriculture. ACIAR Monograph 32. Australian Centre for International Agricultural Research, Canberra.
46. **Brundrett M.C., 2004.** Diversity and classification of mycorrhizal associations. *Biological Reviews* 79 (3) : 473-495.
47. **Bruno J. F., Stachowicz J. J. and Bertness M. D., 2003.** Inclusion of facilitation into ecological theory. *Tree* 18: 119-125.

---

**C**

48. **Caldwell M.M. and Richards J.H., 1989.** Hydraulic lift: water efflux from upper roots improves effectiveness of water uptake by deep roots. *Oecologia* 79: 1-5.
49. **Canadell J., Jackson R.B., Ehleringer J.R., Mooney H.A., Sala O.E. and Schulze E.D., 1996.** Maximum rooting depth of vegetation types at the global scale. *Oecologia* 108:583-595.
50. **Conrad G., Geze B. et Paloc H., 1967.** Phénomènes karstiques et pseudo-karstiques au Sahara. *Revue Géog. Phys. Géol. dyn.*, IX, 5 : 357-369.
51. **Chaba B., Chraa O. et Khichane M., 1991.** Germination, morphogénèse racinaire et rythmes de croissance du Pistachier de l'Atlas. *In* *Physiologie des arbres et arbustes en zones arides et semi-arides*, Groupe d'Etude de l'Arbre : 465-472.
52. **Chebieb N., 2008.** Approche de l'adaptation de l'architecture racinaire du pistachier de l'Atlas (*Pistacia atlantica* Desf. subsp. *atlantica*) à la sécheresse : cas de la daya de Timzerth (Wilaya de Laghouat, Algérie). Mémoire d'ingénieur Agronome. Département des Sciences Agronomiques. Faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques. Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, Algérie. 100 p.
53. **Cordier C., Pozo M.J., Barea J.M., Gianinazzi S. and Gianinazzi-Pearson V., 1998.** Cell defence responses associated with localized and systematic resistance to *Phytophthora parasitica* induced by an arbuscular mycorrhizal fungus. *Molecular Plant-Microbe Interactions* 11: 1017-1028.
54. **Cortina J., Ruiz-Mirazo J., Amat B., Amghar F., Bautista S., Chirino E., Derak M., Fuentes D., Maestre F.T., Valdecantos A. et Vilagrosa, A., 2012.** Les bases de la restauration écologique des steppes d'alfa. UICN, Gland, Suisse et Malaga, Espagne. VI + 26 p.

---

**D**

55. **Daniels Hetrick B.A., Leslie J.F., Thompson Wilson G. and Gerschefske Kitt G.D., 1988.** Physical and topological assessment of effects of a vesicular-arbuscular mycorrhizal fungus on root architecture of big bluestem. *New Phytologist* 110: 85-96.
56. **Darwin C.R. 1880.** *The Power of Movements in Plants*. London: John Murray. (<http://darwin-online.org.uk/>). [Consulté en janvier 2018].
57. **Dawson T.E., 1993.** Hydraulic lift and water use by plants: implications for water balance, performance and plant-plant interactions. *Oecologia* 95: 565-574.
58. **De la Providencia I.E., De Souza F.A., Fernández F., Delmas N.S., and Declerck S., 2005.** Arbuscular mycorrhizal fungi reveal distinct patterns of anastomosis formation and hyphal healing mechanisms between different phylogenetic groups. *New Phytologist* 165: 261–271.
59. **De Rosnay J., 1975.** *Le Macroscopie : “Vers une vision globale”*. Edition du Seuil, 249 p.
60. **Deguiche M., 2008.** Caractérisation des sols sous pistachier de l’Atlas (*Pistacia atlantica* Desf.) : cas de la daya de Timzerth (wilaya de Laghouat). Mémoire Ing. Agronome. Département des Sciences Agronomiques. Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 88 p.
61. **Demangeot J. et Bernus E., 2001.** *Les Milieux Désertiques*. Paris, France: Armand Collin.
62. **Dickson S., 2004.** The Arum–Paris continuum of mycorrhizal symbioses. *New Phytologist* 163(1), 187-200.
63. **Dobson M.C. and Moffatt A.J., 1995.** A re-evaluation of objections to tree planting on containment landfills. *Waste Manage Res* 13: 579–600.
64. **Drénou C., 2006.** *Les racines : Face cachée des arbres*. Paris : Institut pour le développement forestier CNPPF ; 335 p.
65. **Duchesne L.C., Peterson R.L. and Ellis B.E., 1989.** The future of ectomycorrhizal fungi as biological control agents. *Phytoprotection* 70: 51-57.
66. **Dutil P., 1971.** Contribution à l’étude des sols et des paléosols sahariens. Th. Doc. d’Etats ès-Sciences, Toulouse.
67. **Duvdevani S. 1957.** Dew research for arid agriculture. *Discovery*, 18, 330-334.

68. **Eason W.R., Newman E.I. and Chuba P.N., 1991.** Specificity of interplant cycling of phosphorus: the role of mycorrhizas. *Plant and Soil* 137: 267-274.
69. **El-Oqlah A.A., 1996.** Biosystematic research on the genus *Pistacia* in Jordan. In S. Padulosi, T. Caruso & E. Barone (Eds), *Taxonomy, distribution, conservation and uses of Pistacia genetic resources*, Workshop, Palermo 1995 (pp. 12–19). Rome. Int. Pl. Genet. Res. Inst.
70. **Emberger L., 1955.** Une classification biogéographique des climats. *Rec. Trav. Lab. Bot. Géol. Fac. Sc.* 7(11) : 3-43.

---

**F**


---

71. **Fabre J., 1971.** Structure de l'Algérie saharienne. Eléments pour une carte tectonique. *Bull. Ser. Géol. Algérie. Nouvelle série*, pp : 161-185.
72. **FAO, 2001.** *Global Forest Resources Assessment 2000. Main report.* FAO Forestry Paper N°. 140. Rome. Italy.
73. **FAO, 2009.** Water Development and Management Unit. Website: [http://www.fao.org/nr/water/infores\\_databases\\_cropwat.html](http://www.fao.org/nr/water/infores_databases_cropwat.html). [Consulté en Novembre 2013].
74. **Favrot J.C. et Vizier J.F., 1988.** Les sols à caractère hydromorphe (ensemble cognat). *In* : *Référentiel pédologique français : 2è proposition*, novembre 1988. Plaisir : AFES, p. 105-112.
75. **Fitter A.H., 1987.** An architectural approach to the comparative ecology of plant root systems. *New Phytologist* 106, 61–77.
76. **Floret Ch. et Pontanier R., 1982.** L'aridité en Tunisie présaharienne : Climat, sol, végétation et aménagement. *Travaux et documents de l'ORSTOM n° 150.*

---

**G**


---

77. **Gallaud I., 1905.** Études sur les mycorrhizes endophytes. *Revue Générale de Botanique* 17: 5-48, 66-83, 123-136, 223-239, 313-325, 425-433, 479-500.
78. **Ganatsas P. and Tsakalidimi M., 2003.** Root system modification of *Pinus brutia* Ten. species under adverse ecological conditions. *Proc. 8<sup>th</sup> Int. Conf. on Environmental Science and Technology, Lemnos Island, Greece, 8–10 Sept. Vol. B*, pp. 216–223.

79. **Gausсен H., Leroy J.F. et Ozenda P., 1982.** Précis de botanique 2. Végétaux supérieurs. Masson, Paris, 2<sup>ème</sup> éd., 580p.
80. **Germana C., 1997.** The response of pistachio trees to water stress as affected by two different rootstocks. *Acta Horticulturae* (ISHS), 449: 513-519.
81. **Ghanem B.R. et Benhassaini H., 2008.** Etude des phytostérois et acides gras de pistachier de l'Atlas et vrai. *Revue des régions arides* ISSN 0330-7956 N°21, pp. 250-254.
82. **Gibbens R.P. and Lenz J.M., 2001.** Root systems of some Chihuahua desert plants. *Journal of Arid Environments* 49: 221-263.
83. **Gibelli G., 1879.** La malattia del castagno, osservazioni ed esperienze [Maladie de la châtaigne, observations et expériences] (1875-1878). *Bollettino Comizio Agrario Modena*.
84. **Gibelli G., 1882.** La malattia del castagno detta dell'inchiostro, nuovi studi e ricerche [Maladie de la châtaigne appelée encre, nouvelles études et recherches] (1879-1882). *Annali Agric.*, 9-47.
85. **Gibelli G., 1883.** Nuovi studi sulla malattia del castagno detta dell'inchiostro. *Memorie R. Accad. Sci. Ist. Bologna, Serie IV, 4, fascicolo 2*: 287-314.
86. **Girlanda M., Ghignone S. and Luppi A.M., 2002.** Diversity of sterile root-associated fungi of two Mediterranean plants. *New Phytologist* 155:481-498.
87. **Guobin L., 1999.** Soil Conservation and Sustainable Agriculture on the Loess Plateau: Challenges and Prospects. *Ambio* Vol. 28, N°. 8. *Ecosystem Research and Management in China*, pp. 663-668.
88. **Grandmaison J., Olah G.M., van Calsteren M.R. and Furlan V., 1993.** Characterisation and localisation of plant phenolics likely involved in the pathogen resistance expressed by endomycorrhizal roots. *Mycorrhiza* 3: 155-164.
89. **Gregory P., 2006.** *Plant Roots: Growth, Activity and Interaction with Soils*. Dundee, UK: Blackwell Publishing.
90. **Gregory P.J., McGowan M., Biscoe P.V. and Hunter B., 1978.** Water relations of winter wheat: Growth of the root system. *J Agr Sci* 91: 91-103.
91. **Griffiths R.P., Baham J.E. and Caldwell B.A., 1994.** Soil solution chemistry of ectomycorrhizal mats in forest soil. *Soil Biology Biochemistry* 26: 331-337.
92. **Gwenzi W., Veneklaas E.J., Holmes K.W., Bleby T.M., Phillips I.R. and Hinz C., 2011.** Spatial analysis of fine root distribution on a recently constructed ecosystem in a water-limited environment. *Plant Soil* 348: 471-489.

93. **Habib H., Pagès L., Jordan M.O., Simmoneau T. et Sébillotte M., 1991.** Approche à l'échelle du système racinaire de l'absorption hydrominérale. Conséquences en matière de modélisation. *Agronomie* 11: 623-643.
94. **Haboul C., 2011.** Approche de l'adaptation d l'architecture racinaire du pistachier de l'Atlas (*Pistacia atlantica* Desf. ssp. *atlantica*) à la sécheresse : cas de la population de la daya de Boucédraïa (wilaya de Djelfa). Mémoire d'ingénieur Agronome, Département des Sciences Agronomiques, Université Mouloud Mammeri, Tizi Ouzou. 121 p.
95. **Hadj Aissa F.Z., 2004.** Etude de l'évolution de l'activité anti-oxydante des feuilles et des fruits du pistachier de l'atlas (*Pistacia atlantica* desf). Mémoire de Magister. Laboratoire des Sciences Fondamentales. Université Omar Telidji de Laghouat, Algérie. 108p.
96. **Hairiah K. et van Noordwijk M., 1986.** Root studies on a tropical ultisol in relation to nitrogen management: report of field work at IITA's high rainfall substation at Onne (Port Harcourt, Nigeria) in 1985 (No. 7-86). IB.
97. **Hamitouche F., 2016.** Influence des propriétés physico-chimiques du sol sur l'architecture racinaire de *Pistacia atlantica* Desf. de Dayate El Gouffa, commune Ain Madhi, W. Laghouat. Mémoire de Magister. Département des sciences Biologiques. Faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques. Université Mouloud Mammeri, Tizi Ouzou, 111 p.
98. **Hannachi A., 1981.** Relations entre aquifères profonds et superficiels : hydrogéologie de la vallée de l'Oued M'Zi, à l'est de Laghouat, Wilaya de Laghouat (Algérie). Géologie appliquée. Thèse 3<sup>ème</sup> cycle. Université Scientifique et Médicales de Grenoble. 227 p.
99. **Harley J.L. and Smith S.E., 1983.** Mycorrhizal Symbiosis. Academic Press, Toronto.
100. **Harper J.L., Jones M. and Sackville Hamilton N.R., 1991.** The evolution of roots and the problems of analysing their behaviour. *In*: Atkinson D. (Ed), Plant Root Growth: An Ecological Perspective, pp. 3-22. London, UK: Blackwell Scientific Publications. 478 pp.
101. **Haselwandter K. and Read D.J., 1982.** The significance of a root-fungus association in two *Carex* species of high-alpine plant communities. *Oecologia* 53:352–354.

102. **Higgins K.B., Lamb A.J. and Van Wilgen B.W., 1987.** Root systems of selected plant species in mesic mountain fynbos in the Jonkershoek Valley, south-western Cape Province. *S Afr J Bot* 53: 249–257.
103. **Hillel D., 1998.** Environmental Soil Physics. San Diego, CA, USA: Academic Press.
104. **Hodge A., Berta G., Doussan C., Merchan F. and Crespi M., 2009.** Plant root growth, architecture and function. *Plant Soil* 321: 153–187.

---

**I**


---

105. **Ifticene-Habani N. et Messaoudène M., 2016.** Croissance radiale et sensibilité au climat du pistachier de l'Atlas, *Pistacia atlantica* Desf., en Algérie. *Bois et forêts des tropiques*, 329 (3) : 3-15 p.

---

**J**


---

106. **Jackson R.B., Canadell J., Ehleringer J.R., Mooney H.A., Sala O.E. and Schulze E.D. 1996.** A global analysis of root distributions for terrestrial biomes. *Oecologia* 108: 389–411.
107. **Jennings C.H.M., 1974.** The hydrology of Botswana. PhD thesis, University of Natal.
108. **Jobbagy E.G. and Jackson R.B., 2001.** The distribution of soil nutrients with depth: global patterns and the imprint of plants. *Biogeochemistry* 53: 51–77.
109. **Jumpponen A. and Trappe J.M., 1998.** Dark septate endophytes: a review of facultative biotrophic root colonizing fungi. *New Phytologist* 140: 295-310.

---

**K**


---

110. **Kaabache M., 2003.** Rapport sur la : Conservation de la biodiversité et gestion durable des ressources naturelles : Etude sur la réhabilitation de la flore locale au niveau de la réserve « El-Mergueb » (Wilaya de M'sila, Algérie). PNUD. Projet : ALG /00 /G35 / A/1G/99.
111. **Kadi-Bennane S., Ait Said S. et Smail Saadoun N., 2005.** Etude adaptative de trois populations de *Pistacia atlantica* Desf. subsp *atlantica* (Ain Oussera- Messaad-Taissa), par le biais du complexe stomatique. *Options Méditerranéennes, Série A*, 63 : pp 365-368.

112. **Kageyama S. A., Mandyam K. G., Jumpponen A., 2008.** “Diversity, function and potential applications of the root-associated endophytes,” *In Mycorrhiza – State of the Art, Genetics and Molecular Biology, Eco-Function, Biotechnology, Ecophysiology, Structure and Systematics*, ed. Varma A., editor. (Berlin: Springer-Verlag), 29–59.
113. **Kahiluoto H. and Vestberg M., 1998.** The effect of arbuscular mycorrhiza on biomass production and phosphorus uptake from sparingly soluble sources by leek (*Allium porrum* L.) in Finnish field soils. *Biological Agriculture and Horticulture* 16: 65-85.
114. **Kebei S., 2008.** Approche de l’adaptation de l’architecture racinaire du pistachier de l’Atlas (*Pistacia atlantica* Desf. subsp. *atlantica*) à la sécheresse : cas de la population de Tirlhemt (Wilaya de Laghouat). Mémoire d’ingénieur Agronome. Département des Sciences Agronomiques. Faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques. Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, Algérie. 118 p.
115. **Kendrick B., 1985.** The Fifth Kingdom. Mycologue Publications. Waterloo, Ontario.
116. **Kernaghan G. and Patriquin G., 2011.** Host associations between fungal root endophytes and boreal trees. *Microb Ecol* 62: 460–473 doi: 10.1007/s00248-011-9851-6.
117. **Khaldi A. and Khouja M.K., 1996.** Atlas pistachio (*Pistacia atlantica* Desf.) in North Africa: taxonomy, geographical distribution, utilization and conservation. *In* Padulosi, Caruso and Barone, Project on underutilized mediterranean species: Taxonomy, distribution, conservation and uses of *Pistacia* genetic resources. Report of a workshop IPGRI, 29-30 june 1995 palermo, Italy.
118. **Khelifati S., 2013.** Prévision du plan directeur d’aménagement et d’urbanisme de la commune de Sidi Naamane. Centre d’Etudes et de Réalisation en Urbanisme URBA. Blida). Code du projet : étude PDAU/Mé/2 et 3/12.75 p.
119. **Kummerow, J. et Mangan, R. 1981.** Root systems in *Quercus dumosa* Nutt. dominated chaparral in southern California. *Acta Oecologica*.
120. **Kuo M.J. and Alexander M., 1967.** Inhibition of the Lysis of Fungi by Melanins. *J. Bacteriol.* vol. 94. N° 3: 624-629.

121. **Laamouri A., Ammari Y., Albouchi A., Sghaier T., Mguis K.L. et Akrimi N., 2008.** Etude comparative de la croissance et du développement du système racinaire de trois espèces de jujubier en Tunisie. *Geo-Eco-Trop*, 32 : 37-46 p.
122. **Le Houérou H.N., 1995.** Bioclimatologie et biogéographie des steppes arides du Nord de l'Afrique : Diversité biologique, développement durable et désertisation. *Options méditerranéennes. Série B*, 10 : 396 p.
123. **Le Houerou H.N et Claudin J., 1972.** Carte Géologique de la région d'El-Hodna au 500 000<sup>ème</sup>. F.A.O.
124. **Le Houerou, H.N., Claudin, J., Donadieu, P., et Haywood, M., 1975.** Etude phytoécologique du Hodna (Algérie). 154 pp. AGO, FAO, Rome.
125. **Lewis J.D. and Koide R.T., 1990.** Phosphorus supply, mycorrhizal infection and plant offspring vigour. *Functional Ecology* 4: 695-702.
126. **Lemée G., 1978.** Précis d'écologie végétale. Masson et Cie, Paris, 285 p.
127. **Limane A., 2009.** Architecture racinaire du pistachier de l'Atlas en relation avec les propriétés physico-chimiques du sol sous-jacent: cas de la population de la réserve nationale d' « El-Mergueb » (Wilaya de M'sila), Algérie. Mémoire de Magister. Faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques. Département de biologie animale et végétale. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie. 157 p.
128. **Limane A. et Smail-Saadoun N., 2011.** Root System Adaptation of *Pistacia atlantica* subsp. *atlantica* for textural variations of its soil: case of Mergueb's population (M'sila, Algeria). Proceedings of the V<sup>th</sup> International Symposium on Pistachios and Almonds: Şanlıurfa, Turkey, October 13-17, 2009. No 912, pp. 231-237.
129. **Limane A., Smail-Saadoun N., Belkebir-Boukais A., Kissoum-Hamdini K., 2014.** Root architecture adaptation of *Pistacia atlantica* subsp *atlantica* according to an increasing climatic and edaphic gradient: case of north-south transect in Algeria. *Turkish Journal of Botany*, 38 (3): 536-549.
130. **Little L.R. and Maun M.A. 1996.** The 'Ammophila problem' revisited: a role for mycorrhizal fungi. *Journal of Ecology* 84: 1-7.
131. **Lynch J., 1995.** Root architecture and plant productivity. *Plant Physiol* 109:7–13.

132. **MacArthur R.H. and Wilson E.O. 1967.** The Theory of Island Biogeography. Princeton, NJ: Princeton University Press.
133. **Malamy J.E., 2005.** Intrinsic and environmental response pathways that regulate root system architecture. *Plant Cell Environment* 28: 67-77.
134. **Mandyam K. G. and Jumpponen A., 2014.** Mutualism–parasitism paradigm synthesized from results of root-endophyte models. *Front Microbiol*: 5: 776.
135. **McGee P.A., 1989.** Variation in propagule numbers of vesicular-arbuscular mycorrhizal in a semi-arid soil. *Mycol. Res.* 92, 28-33.
136. **Mechiah F., 2015.** Approche des symbioses racinaires de *Pistacia atlantica* Desf. de dayate El Gouffa (Laghouat, Algérie). Mémoire de Magister. Département de biologie. Faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie.
137. **Medjnoun A., 2014.** Analyse, caractérisation, prévision et modélisation du comportement des argiles gonflantes. Thèse de Doctorat. Faculté de Génie de Construction. Département de Génie Civil. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie. 172 p.
138. **Mellah H., 2007.** Approche anatomique des radicelles du pistachier de l'Atlas (*Pistacia atlantica* Desf. subsp. *atlantica*) : cas de la population de Oued Bésbès, Wilaya de Médéa. Mémoire d'ingénieur Agronome. Département des Sciences Agronomiques. Faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques. Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, Algérie. 86 p.
139. **Melzi S., 1993.** Evolution de la végétation et du milieu dans la région présaharienne des steppes algériennes. *Sécheresse* 4 : 113-6.
140. **Miller R.M. and Jastrow J.D., 1992.** Extraradical hyphal development of vesicular arbuscular mycorrhizal fungi in a chronosequence of prairie restorations, pp. 171-176. *In* Read D.J., Lewis D.H., Fitter A.H. and Alexander I.J., 1992. (Eds.). *Mycorrhizas in Ecosystems*. Wallingfor, Oxonn: CAB International, Cambridge, United Kingdom.
141. **Miller R.M., Hetrick B.A.D. and Wilson G.W.T., 1997.** Mycorrhizal fungi affect root stele tissue in grasses. *Canadian Journal of Botany* 75: 1778-1784.
142. **Mitchel A., 1991.** Tous les arbres de nos forêts. Collection : Multiguides nature. Bordas Editions. 414 p.
143. **Monjauze A., 1967.** Note sur la régénération du Bétoum par semis naturels dans la place d'essais de Kef Lefaa. *Bull. Soc. Hist. Afr. du Nord* 57: 59-65.

144. **Monjauze A., 1968.** Répartition et écologie de *Pistacia atlantica* Desf. en Algérie. Bull. Soc. Hist. Afr. du Nord 56, 128 p.
145. **Monjauze A., 1980.** Connaissance du Bétoum (*Pistacia atlantica* Desf.). Biologie et forêt, XXXII- 4 : 357-383.
146. **Morin C., Samson J. and Dessureault M., 1999.** Protection of black spruce seedlings against *Cylindrocladium* root rot with ectomycorrhizal fungi. Canadian Journal of Botany 77: 169-174.
147. **Morot-Gaudry J.F., Moreau F., Prat R., Maurel C. et Sentenac H., 2009.** Biologie végétale, Nutrition et métabolisme. Paris, France. Edition Dunod.

---

**N**


---

148. **Nègre R., 1962.** Petite flore des régions arides du Maroc occidental. Tome II. Ed. C.N.R.S.
149. **Neilson R.P., 1995.** A model for predicting continental-scale vegetation distribution and water balance. Ecol Appl 5: 362–385.
150. **Newsham K.K., 1999.** *Phialophora graminicola*, a dark septate fungus, is a beneficial associate of the grass *Vulpia ciliata* ssp. *ambigua*. New Phytologist 144:517–524.
151. **Newsham K.K., 2011.** A meta-analysis of plant responses to dark septate root endophytes. New Phytologist, 190: 783-793.
152. **Newsham K.K., Fitter A.H. and Watkinson A.R., 1995.** Arbuscular mycorrhiza protects an annual grass from root pathogenic fungi in the field. Journal of Ecology 83: 991-1000.
153. **Nicoll B.C., Easton E.P., Milner A., Walker C.D. and Coutts M.P., 1997.** Wind stability factors in tree selection: distribution of biomass within root systems of sitka spruce clones. In: Coutts MP, Grace J (Eds) Wind and wind related damage to trees. Cambridge University Press, Cambridge, pp 276–301.
154. **Nouaouria M.S., Guenfoud M. and Lafifi B., 2008.** Engineering properties of loess in Algeria. Engineering Geology, 99: 85-90.

---

**O**


---

155. **O'Dell T.E., Massicotte H.B. and Trappe J.M., 1993.** Root colonization of *Lupinus latifolius* Agardh. and *Pinus contorta* Dougl. by *Phialocephala fortinii* Wang & Wilcox. New Phytologist 124: 93-100.
156. **Oehl F., Sieverding E., Ineichen K., Mader P., Boller T. and Wiemken A., 2003.** Impact of land use intensity on the species diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in agroecosystems of Central Europe. Appl. Environ. Microbiol. 69: 2616-2624.
157. **Oehl F., van der Heijden M., Jansa J., Ineichen K. and Mäder P., 2011.** Arbuscular mycorrhizal fungi as bio-indicators in Swiss agricultural soils. Recherche Agronomique Suisse.
158. **Ouadah Y., 1982.** Contribution à l'étude des principales essences d'intérêt fourrager des régions semi-arides et arides d'Algérie. Application à quelques espèces. Mémoire d'ingénieur agronome, INA El Harrach, Algérie. 96 p.
159. **Ould Amrouche S. et Hadj Benamane D., 2009.** Contribution à la recherche de la mycoflore endophyte et mycorrhizienne du pistachier de l'Atlas (*Pistacia atlantic* Desf. ssp. atlantica) de la population de Theniet El Had (wilaya de Tissemsilt). Mémoire Ing. Sciences Agronomiques. Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou.
160. **Ozenda P., 1977.** Flore du Sahara. Ed .C.N.R.S, 622 p.
161. **Ozenda P., 1991.** Flore et végétation du Sahara, 3<sup>ème</sup> Ed. CNRS, Paris ,662 p.
162. **Ozenda P., 2004.** Flore et végétation du Sahara. 2<sup>ème</sup> éd. Paris, France. CNRS Ed.

---

**P**

---

163. **Parton W.J., Stewart J.W.B. and Cole C.V., 1988.** Dynamics of C, N, P, and S in grassland soils: a model. Biogeochemistry 5: 109–131.
164. **Pate J.S., Jeschke W.D. and Aylward M.J., 1995.** Hydraulic architecture and xylem structure of the dimorphic root systems of south-west Australian species of *Proteaceae*. J Exp Bot 46: 907–915.
165. **Paterson A.H., Bowers J.E. and Chapman B.A., 2004.** Ancient polyploidization predating divergence of the cereals, and its consequences for comparative genomics. Proc Natl Acad Sci USA 101 : 9903–9908.
166. **Peterson L.R, Massicotte H. B. Melville and L. H., 2004.** Mycorrhizas. Anatomy and Cell Biology. NRC research press. Ottawa 2004. P: 1-3, 147-153.
167. **Peterson R.L., Wagg C. and Pautler M., 2008.** Associations between microfungi endophytes and roots: do structural features indicate function? Canadian Journal of Botany 86: 445–456.

168. **Phillips W. S., 1963.** Depth of roots in soil. *Ecology* 44 (2): 424.
169. **Potter C.S., Randerson J.T., Field C.B., Matson P.A., Vitousek P.M., Mooney H.A. and Klooster S.A., 1993.** Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data. *Global Biogeochem Cy* 7: 811–841.
170. **Pouget M., 1980a.** Les relations sol-végétation dans les steppes sud-algéroises. Travaux et documents de l'O.R.S.T.O.M., Paris, 543 p.
171. **Pouget M., 1980b.** Les sols à croûte calcaire dans les steppes algériennes. Quelques aspects morphologiques et esquisse d'une évolution actuelle. ORSTOM. , esr. *Pédologie*, (3-4) : 235-246.

---

**Q**

172. **Quézel P. et Médail F., 2003.** *Ecologie et biogéographie des forêts du bassin méditerranéen*. Ed. Elsevier (Collection Environnement), Paris, 573 p.
173. **Quézel P. et Santa S., 1963.** *Nouvelle flore de l'Algérie et des régions désertiques méridionales*, Paris, CNRS, 1962-1963, 1170 p.

---

**R**

174. **Raab G., 2010.** Contribution à l'étude des symbioses mycorhiziennes du pistachier de l'Atlas : cas de la population de la daya de Timzerth (wilaya de Laghouat). Mémoire Ing. Agronome. Faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou.
175. **Raich J.W., Rastetter E.B., Melillo J.M., Kicklighter D.W., Steudler P.A., Peterson B.J., Grace A.L., Moore B. III. and Vorosmarty C.J., 1991.** Potential net primary productivity in South America: application of a global model. *Ecol Appl* 1: 399–429.
176. **Raimbault P., 2003.** La physiologie et l'architecture des racines. 9<sup>ème</sup> Congrès de l'APEVC, Institut National d'Horticulture d'Angers, France. 22-29.
177. **Read D.J. and Haselwandter K., 1981.** Observation on the mycorrhizal status of some alpine plant communities. *New Phytologist* 88:341–352.
178. **Redecker D., Schüßler A., Stokinger H., Stürmer S.L., Morton J.B., Walker C. 2013.** An evidence-based consensus for the classification of arbuscular mycorrhizal fungi (Glomeromycota). *Mycorrhiza* 23: 515-531.

179. **Redjdal L., 2010.** Contribution à l'étude des symbioses mycorhiziennes du pistachier de l'Atlas, cas de la population du centre de la daya de Tirlhemt (wilaya de Laghouat). Mémoire d'ingénieur d'Etat en Sciences Agronomiques. Faculté des sciences Biologiques et des sciences agronomiques. Université Mouloud Mammeri, Tizi Ouzou.
180. **Redman R.S., Sheehan K.B., Stout R.G., Rodriguez R.J. and Henson J.M., 2002.** Thermotolerance conferred to plant host and fungal endophyte during mutualistic symbiosis. *Science* 298: 1581.
181. **Requena N., Serrano E., Ocon A., Breuninger M. 2007.** Plants signals and funal perception during arbuscular mycorrhiza establishment. *Phytochemistry* **68**: 33-40.
182. **Richards J.H. and Caldwell M.M., 1987.** Hydraulic lift: substantial nocturnal water transport between soil layers by *Artemisia tridentata* roots. *Oecologia* 73: 486–489.
183. **Roche M.A., 1973.** Hydrogéologie de la haute Saoura (Sahara Nord-Occidental). C.N.R.S, Paris, 91p.
184. **Rognon P., 1994.** Les conséquences de la sécheresse sur la pédogenèse. *Sécheresse*, 3(5) : 173-184.
185. **Rood S.B., Bigelow S.G. and Hall A.H., 2011.** Root architecture of riparian trees: river cut-banks provide natural hydraulic excavation, revealing that cottonwoods are facultative phreatophytes. *Trees-Struct Funct* 25: 907–917.
186. **Ruellan A., 1970.** Sols à croûtes .Cahier de l'ORSTOM. Collection de référence n°/3172 ex/. (In : *Encyclopedia Universalis*).

---

**S**


---

187. **Schenk H.J. and Jackson R.B., 2002a.** The global biogeography of roots. *Ecol Monogr* 72: 311–328.
188. **Schenk H.J. and Jackson R.B., 2002b.** Rooting depths, lateral spreads and below-ground/above-ground allometries of plants in water limited ecosystems. *J Ecol* 90: 480–494.
189. **Schenk H.J. and Jackson R.B., 2005.** Mapping the global distribution of deep roots in relation to climate and soil characteristics. *Geoderma* 126: 129-140.
190. **Schulz B. and Boyle C., 2005.** The endophytic continuum. *Mycol Res.* 109 (Pt 6):661-86.

191. **SchÜbler A. and Walker C. 2011.** Evolution of the “plant-symbiotic” fungal phylum, Glomeromycota, *In*: Esser K., Poggeler S., Wostemeyer J. (Eds.) The mycota. Evolution of fungi and fungal-like organisms XIV, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, pp. 163-185.
192. **Schwarzott D., Walker C. and Schußler A., 2001.** *Glomus*, the largest genus of the arbuscular mycorrhizal fungi (Glomales), is non-monophyletic. *Molecular Phylogenetics and Evolution* 21: 190-197.
193. **Schweiger P.F., Robson A.D. and Barrow N.J., 1995.** Root hair length determines beneficial effect of a *Glomus* species on shoot growth of some pasture species. *New Phytologist* 131: 247-254.
194. **Schweiger P.F., Robson A.D. and Barrow N.J., 1995.** Root hair length determines beneficial effect of a *Glomus* species on shoot growth of some pasture species. *New Phytologist* 131: 247-254.
195. **Seigue A., 1985.** La forêt circumméditerranéenne et ses problèmes. Ed Maisonneuve et Larousse, 495 p.
196. **Selosse M.A. and Le Tacon F., 1998.** The land flora: a phototroph-fungus partnership? *Trends in Ecology & Evolution* 13 (1), 15-20.
197. **Sieber T.N. and Grünig C.R., 2006.** Biodiversity of Fungal Root-Endophyte Communities and Populations, in Particular of the Dark Septate Endophyte *Phialocephala fortinii* s. l. *Microbial Root Endophytes*. Volume 9 of the series *Soil Biology* pp 107-132.
198. **Simard S.W., Perry D.A., Jones M.D., Myrold D.D., Durall D.M. and Molina R., 1997.** Net transfer of carbon between ectomycorrhizal tree species in the field. *Nature* 388: 579-582.
199. **Smail-Saadoun N., 2005.** Types stomatiques du genre *Pistacia atlantica* Desf subsp *atlantica* et *Pistacia lentiscus* L. *Options Méditerranéennes. Série A : Séminaires Méditerranéens (CIHEAM) N° 63* : pp 369-371.
200. **Soltner D., 1982.** Les bases de la production végétale. Tome 1. Le sol. 1<sup>ère</sup> édition. Sciences et techniques agricoles, Angers, 472 p.
201. **Speranza A. et Calzoni G.L., 2005.** Atlas de la structure des plantes: guide de l'anatomie microscopique des plantes vasculaires en 285 photos. Belin Eds., 223 p.
202. **Spichiger R.E., Savolainen V.V., Figeat M. et Jeanmonod D., 2004.** Botanique systématique des plantes à fleurs : une approche phylogénétique nouvelle des

- Angiospermes des régions tempérées et tropicales. Troisième édition revue et corrigée. Presses Polytechniques et Universitaire Romandes. 413 p.
203. **Stanley M.R., Koide R.T. and Shumway D.L., 1993.** Mycorrhizal symbiosis increases growth, reproduction and recruitment of *Abutilon theophrasti* Medic. in the field. *Oecologia* 94: 30-35.
204. **Stone E.L. and Kalisz P.J., 1991.** On the maximum extent of tree roots. *Forest Ecol Manage* 46: 59–102.
205. **Struik G.J. and Bray J.R., 1970.** Root: shoot ratios of native forest herbs and *Zea mays* at different soil moisture levels. *Ecology* 51: 892-893.
206. **Strullu D.G., 1990.** Les mycorhizes des arbres et plantes cultivées. Collection TEC & DOC, Lavoisier, Paris, 250 p.
207. **Sultan S.E., 2003.** Phenotypic plasticity in plants: a case study in ecological development. *Evolution and Development* 5:1, 25-33.

---

**T**


---

208. **Tahrour A., 2005.** Architecture racinaire et adaptation du pistachier de l'Atlas (*Pistacia atlantica*) à la sécheresse. Cas de la population d'Oued Bésbès (Wilaya de Médéa). Mémoire d'ingénieur Agronome. Département des Sciences Agronomiques. Faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques. Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, Algérie. 101p.
209. **Taibi A.N., Kemmouche A. et Parrot J.F., 1999.** Détermination des dynamiques d'évolution morphologique et végétale combinées des « dayas » du piémont sud de l'Atlas saharien (Algérie) par télédétection. *Sécheresse*, Volume 10, Numéro 1, 63-70.
210. **Taniguchi T., Usuki H., Kikuchi J., Hirobe M., Miki N., Fukuda K., Zhang G., Wang L., Yoshikawa K. and Yamanaka N., 2012.** Colonization and community structure of root-associated microorganisms of *Sabina vulgaris* with soil depth in a semiarid desert ecosystem with shallow groundwater. *Mycorrhiza* 22:419–428. DOI 10.1007/s00572-011-0417-8
211. **Tarafdar J.C. and Marschner H., 1994.** Efficiency of VAM hyphae in utilisation of organic phosphorus by wheat plants. *Soil Science and Plant Nutrition* 40: 593-600.
212. **Tisgouine Z., 2010.** Approche de caractéristiques physiques et chimiques des sols sous pistachier de l'Atlas de la forêt de Theniet El Had (wilaya de Tissemsilt). Mémoire Ing. Agronome. Département des Sciences Agronomiques. Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 68 p.

213. **Tufekcioglu A., Raich J.W., Isenhardt T.M. and Schultz R.C., 1999.** Fine root dynamics, coarse root biomass, root distribution, and soil respiration in a multispecies riparian buffer in Central Iowa, USA. *Agroforest Syst* 44: 163–174.

---

**UWYZ**

---

214. **UNEP (Ed.), 1992.** World Atlas of Desertification. United Nations Environment Programme. London, Baltimore. Edward Arnold Ed.
215. **Walter H., 1971.** Ecology of Tropical and Subtropical Vegetation. Edinburgh, UK: Oliver and Boyd.
216. **Watt M. and Weston L.A., 2009.** Specialised root adaptations display cell-specific developmental and physiological diversity. *Plant Soil* 322: 39-47.
217. **Whittaker R.J., Triantis K.A. and Ladle R.J. 2008.** A general dynamic theory of oceanic island biogeography; *J. Biogeogr.* 35: 977-994.
218. **Wickens G. E., 1984.** Flora. pp. 67-75; *In* Cloudsley-Thompson J. L., - Sahara desert. Pergamon Press. Paris. 348 p.
219. **Wikimedia.org., 2015:** <https://www.wikimedia.org/>
220. **Yaaqobi A., El Hafid L. et Haloui B., 2009.** Etude biologique de *Pistacia atlantica* Desf. de la région orientale du Maroc. *Biomatec Echo*, 3(6), 39-49.
221. **Yu T.C., Egger K.N. and Peterson R.L., 2001.** Ectendomycorrhizal associations - Characteristics and functions. *Mycorrhiza* 11: 167-177.
222. **Zareb A., 2014.** Contribution à l'étude des mycoendophytes foliaires du pistachier de l'Atlas (*Pistacia atlantica* Desf.) de dayate Aiat (Timzerth, Laghouat, Algérie). Mémoire de Magister. Faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques. Département des Sciences Agronomiques, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, Algérie. 146 p.
223. **Zohary M., 1952.** A monographical study of the genus *Pistacia*. *Palest. J. Bot.*, Jerusalem Series. 5:187-228.
224. **Zohary M., 1996.** The genus *Pistacia* L. *In*: Taxonomy, distribution, conservation and uses of *Pistacia* genetic resources. Proceeding of the IPGRI Workshop 29-30 June 1995. Edited by S. Padulosi, T. Caruso and E. Barone. Palermo, Italy. Pp. 1-11.



# Annexes

- Annexe 1 : normes d'appréciation de la réaction du sol (pH) (Baize, 2000).

pH	< 3,5	Hyper-acide
	3,5 – 4,2	Très acide
	4,2 - 5	Acide
	5 – 6,5	Peu acide
	6,5 – 7,5	Neutre
	7,5 – 8,7	Basique
	> 8,7	Très basique

- Annexe 2 : normes d'appréciation du calcaire total du sol (Baize, 2000)

CaCO <sub>3</sub> (%)	< 1	Horizon non calcaire
	1 à 5	Horizon peu calcaire
	5 à 25	Horizon modérément calcaire
	25 à 50	Horizon fortement calcaire
	50 à 80	Horizon très fortement calcaire
	> 80	Horizon excessivement calcaire

- Annexe 3 : normes d'appréciation de la matière organique (Soltner, 1982).

MO (%)	0 - 1	Extrêmement faible
	1 - 1,5	Très faible
	1,5 - 2,5	Faible
	2,5 - 3,5	Moyenne
	3,5 - 4,5	Moyennement élevée
	4,5 - 5	Elevée
	> 5	Très élevée

- Annexe 4

Tableau 59 : moyennes (en %) des variables racinaires et édaphiques des quatre populations du transect nord-sud choisis.

Stations	RS	RP	CR	A	LT	ST	CaCO <sub>3</sub>	MO
Sidi Naamane	89.8	10.2	37.85	38.18	30.31	31.51	20.96	6.95
Daya el Mergueb	72.88	27.12	25.4	9.89	21.25	68.86	13.06	3.29
Daya Lekhneg	61.67	38.8	27.74	16.7	15.71	69.83	9.16	3.12
Béni Ounif	66.2	33.8	24.59	9.31	12.42	79.28	17.75	1.45

• ANNEXE 5

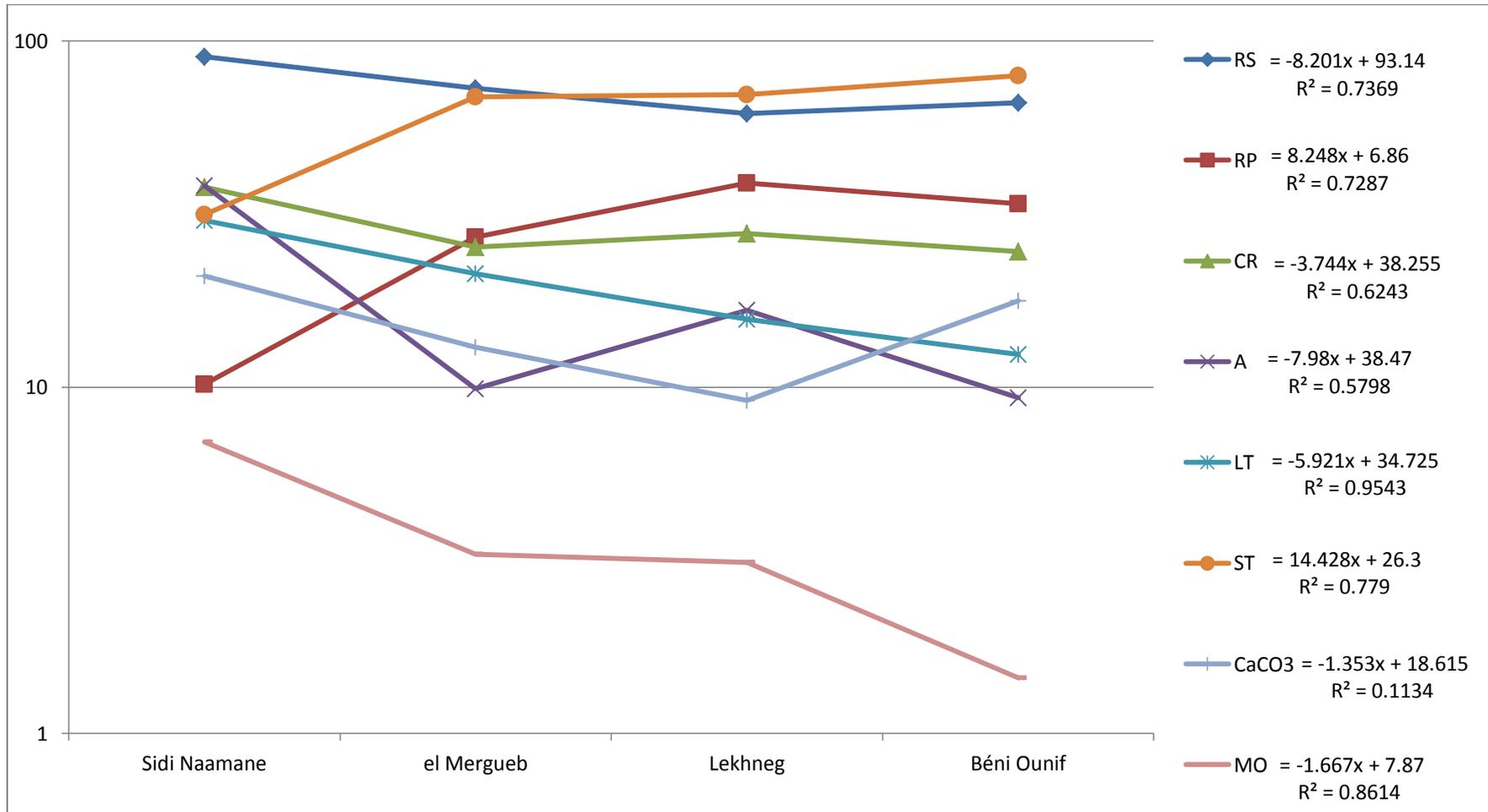


Fig. 110 : évolution des principales variables édaphiques et racinaires et leurs courbes de tendances respectives, le long du transect nord-sud choisis.

**Légende :** RS : proportion des racines superficielles (%) ; RP : proportion des racines profondes (%) ; CR : capacité de rétention en eau des sols (%) ; A : taux des argiles (%) ; LT : taux des limons totaux ; ST : taux des sables totaux (%) ; CaCO<sub>3</sub> : Taux de calcaire total ; MO : taux de matière organique.

• ANNEXE 6

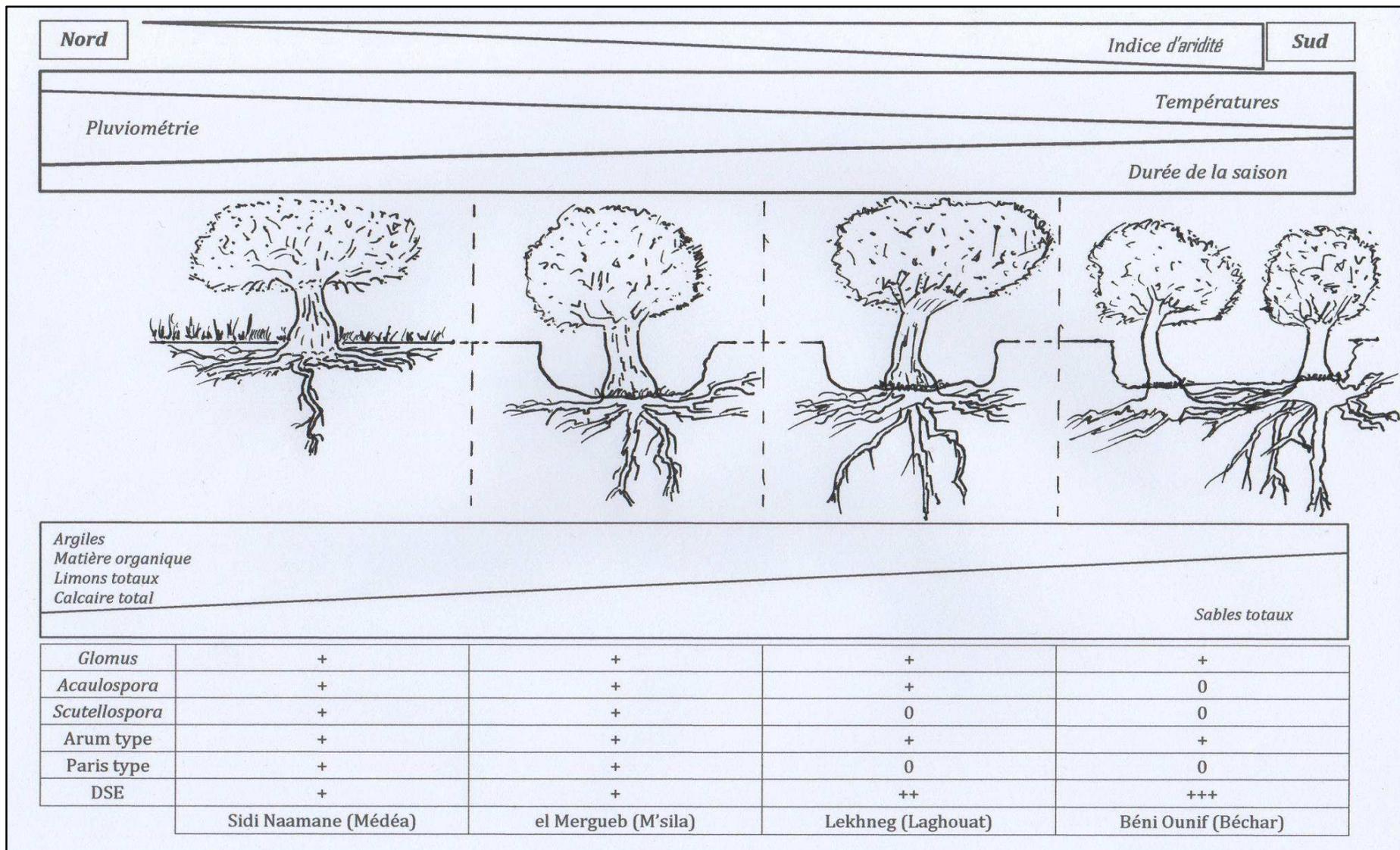


Fig. 111 : synoptique montrant les principaux résultats (en moyennes) de l'étude de la variabilité de l'architecture racinaire du pistachier de l'Atlas (*Pistacia atlantica* Desf.) et des symbiotes racinaires qui lui sont associés le long d'un gradient d'aridité climatique et édaphique croissante en Algérie.

**Résumé :** Malgré les conditions de xéricité, *Pistacia atlantica* Desf. (pistachier de l'Atlas) réussi à développer des dimensions dendrométriques impressionnantes (25 m de hauteur, 2 m de circonférence de tronc). Il est parmi les rares phanérophytes spontané de la steppe Nord-Africaine. L'accès à l'eau étant la condition essentielle pour la survie, nous avons dès lors ciblé son système racinaire. Selon un gradient d'aridité climatique et édaphique croissante en Algérie, nous avons enregistré les différentes architectures racinaires exprimées par cet arbre. Nous avons échantillonné son sol sous-jacent et déterminé ses principales caractéristiques physico-chimiques. Nous avons aussi échantillonné les racines fines et explorer les mycorhizes et endophytes potentiels associées. L'architecture racinaire est principalement de type superficiel avec plus de 60% des racines situées dans les 50 premiers cm du sol le long du transect nord-sud. Avec la diminution des précipitations et l'augmentation des températures, de la durée de la saison sèche, et la teneur des sols en sables, le nombre des racines superficielles et de leurs ramifications diminuent, alors que leurs circonférences, et la longueur et circonférences moyennes des racines profondes augmentent. Ces racines profondes et épaisses permettraient l'accès et le stockage de l'humidité présente dans les niveaux profonds. Les racines fines ont montré la présence d'endomycorhizes (VAM) et des mycoendophytes (DSE) chez toutes les populations échantillonnées. Apparemment la richesse spécifique en VAM diminue avec l'augmentation de l'aridité édapho-climatique, alors qu'inversement, la richesse en DSE augmente. Les individus, selon les biotopes, semblent sélectionner les souches de VAM et de DSE les plus performantes et qui augmenteraient d'une façon optimale leurs valeurs sélectives. Il semblerait que les DSE soient les plus favorisés par le pistachier de l'Atlas pour réussir la colonisation des environnements hyperarides.

**Mots clés :** Algérie, steppe Nord-Africaine, aridité climatique, aridité édaphique, *Pistacia atlantica*, architectures racinaire, VAM, DSE.

**Abstract:** Despite xeric conditions, *Pistacia atlantica* succeeds to develop impressive dendrometric dimensions (25 m high and 2 m trunk diameter). It's among the rare spontaneous phanerophytes in the North African steppe. With access to water being the primary condition for survival, we focused on the key body in its acquisition: the root system. According to a gradient of increasing climatic and edaphic aridity, following a north-south transect in Algeria, we recorded the different roots architectures sets up by this tree. We sampled its underlying soil and determined its main physico-chemical characteristics. We also sampled its fine roots and explored the potential presence of endomycorrhizal fungi (VAM) and mycoendophytes (DSE). The root architecture of the Atlas pistachio is mainly of the superficial type with more than 60% of its roots located in the top 50 cm of soil along the north-south transect. With the decrease in precipitation and the rising of temperatures, length of the dry season and the content of sand in soil, we found that the number of superficial roots and their ramifications decrease, while their average circumferences and the number, length and average circumference of the deep roots increase. These deep and thick roots could allow access and storage of moisture present in the deep levels. Fines roots were infected par VAM and DSE in all sampled populations. Apparently and according to the climatic and edaphic gradient, the specific richness in VAM decreases while the DSE richness increases. Individuals, according to their biotopes, seem to select the most successful VAM and DSE strains that would optimally increase their selective values. It seems that the DSE are the most favored by the Atlas pistachio tree to successfully colonize hyperarid environments.

**Key words:** Algeria, North African steppe, climatic aridity, edaphic aridity, *Pistacia atlantica*, roots architectures, VAM, DSE.