



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE DES FRERES MENTOURI CONSTANTINE



Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département de Biologie et Ecologie Végétale

N° d'ordre 23/D3C/2018
N° de série 02/Eco.V/2018

Thèse

En vue de l'obtention de doctorat 3^{ème} cycle
Filière : Biotechnologie-Biologie-Environnement
Spécialité : Gestion Durable des Écosystèmes et Protection de L'environnement

Thème

**Valorisation du Pin pignon (*Pinus pinea L.*) dans la région de
Djebel Ouahch - Constantine**

Présentée par :
TOUABA Chaima

Le :06/03/2018

Devant le jury :

Président :	BENDERRADJI Med El Habib	Prof. UFM Constantine 1
Rapporteur :	ALATOU Djamel	Prof. UFM Constantine 1
Examineurs :	OUAHRANI Ghania	Prof. Université Sétif 1
	CHAIB Ghania	MC.A UFM Constantine 1
	BAZRI Kamel Eddine	MC.A UFM Constantine 1

Année universitaire : 2017/2018



REMERCIEMENTS

Au terme de cette étude, je remercie avant tout Dieu le Tout Puissant, de m'avoir donné la foi et le courage et de m'avoir guidé pour l'accomplissement de ce travail.

Je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements à Monsieur ALATOU D, mon encadreur, qui a bien voulu par son aimable bienveillance, diriger ce travail qu'il trouve ici l'expression de mon profond respect.

Je remercie vivement Mr BENDERRAJI M H, professeur à l'Université des Frères Mentouri Constantine 1, pour avoir accepté de présider le jury et qu'il trouve ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

J'exprime mes plus profonds remerciements à Madame OUAHRANI GH professeur à l'Université Sétif 1, d'avoir accepté de juger ce travail et pour tout l'intérêt qu'il m'a accordé.

Je n'oublierai pas Madame CHAIB GH, maître de conférences à l'Université des Frères Mentouri Constantine 1 qui a bien voulu examiner et juger ce travail.

Mes plus vifs remerciements à Monsieur BAZRI K E D maître de conférence à l'Université des Frères Mentouri Constantine 1.

J'adresse ma chaleureuse et amicale reconnaissance à Monsieur ARFA A M T pour sa bienveillance, ces précieux conseils et ces encouragements, ces conseils et son soutien moral m'ont été très utiles.

Mes profonds remerciements à Monsieur HADEF A qui m'a aidé à réaliser ce travail et à obtenir des résultats concrets et satisfaisants

Je souhaiterais également exprimer toute ma gratitude à Monsieur VENNETIE Michel ingénieur chercheur dans l'UR RECOVER et l'équipes de laboratoire au centre de recherche IRSTEA en Aix- en- Provence.

J'adresse mes remerciements au directeur et au personnel de la conservation des forêts de Constantine pour leur assistance et disponibilité me permettant d'accéder au terrain et particulièrement Monsieur MESBAHI B et Monsieur REZKI.

Je désire terminer en remerciant ma famille, mes amis et mes collègues et particulièrement Gana M.

A tous, je dis Merci

GHAIMA
GHAIMA

Dédicaces

À Mon très cher père, pour ses encouragements incessants et son soutien moral aux moments difficiles qui furent pour moi les meilleurs gages de réussite.

À Ma très chère mère, qui m'a toujours apportée son amour et son sacrifice.

À Mon Fiancé d'être toujours à mes côtés pour me soutenir

À Ma très chère sœur Moussaïba et Mes très chers frères Takieddine, Oussama et sa femme Souâd.

À Mon encadreur Mr ALAÏOU Djamel qui m'a toujours orienté et conseillé

À Mes camarades de la promo d'écologie 2013/2014.

À tous ceux que j'aurais oublié de citer mais qui existent au fond de mon cœur et de ma pensée

À toutes les personnes qui m'ont dit < Non >.

À mon pays.

Je dédie ce travail

CHAIMA

Liste des abréviations

- SIG** : Système d'information géographique
- IFN** : Inventaire forestier national
- IRSTEA** : Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture
- D (1,30) m** : Le diamètre et la circonférence à 1.30 m du sol
- (H_t)** : La hauteur totale
- (H_f)** : La hauteur du fût
- CE** : Coefficient d'élanement
- N** : La densité
- G** : La surface terrière
- V** : Le volume du peuplement
- T_m** : Taux de mortalité
- Tr** : Taux de régénération
- (A)** : Argile
- (L)** : Limon
- (S)** : Sable
- D(a)** : Densité apparent
- MO** : Matière organique
- CE** : Conductivité électrique
- CEC** : Capacité d'échange cationique
- LPA** : Longueur de la partie aérienne
- LPR** : Longueur de la partie racinaire
- LPR/LPA** : Rapport longueur partie racinaire/longueur partie aérienne
- PFA** : Poids frais de la partie aérienne
- PFR** : Poids frais de la partie racinaire
- PSA** : Poids sec de la partie aérienne
- PSR** : Poids sec de la partie racinaire
- PSR/PSA** : Rapport matière sèche partie racinaire/matière sèche partie aérienne
- MDA** : Malonedialdéhyd
- Ch a** : Chlorophylle a
- Ch b** : Chlorophylle b
- Ch a/b** : Le rapport chlorophyllien
- CAT** : Catalase
- PX** : Peroxydase
- LP** : La longueur des pousses
- LF** : La longueur des fleurs mâles
- LA** : La longueur des aiguilles
- NC** : Le nombre des cônes
- NB** : Le nombre des futures branches (rameaux)
- P** : L'axe principal de la branche
- F** : Un axe fort (rameau fort)
- W** : Un axe faible (rameau faible)

Liste des tableaux

Tableau 1. Données climatique de la station de Ain El Bey (1996-2015) ONM.....	48
Tableau 2. Précipitation aux points extrêmes de la forêt de pin pignon (Djebel Ouahch)....	49
Tableau3. Variabilité des précipitations mensuelles de la forêt de pin pignon dans le temps.....	49
Tableau4. Répartition saisonnière des précipitations de la forêt de pin pignon (1996-2015).....	50
Tableau 5. Correction des températures mensuelles (1996-2015).....	52
Tableau 6. Les gradients mensuels des minima, des maxima et des moyennes mensuelles de Constantine.....	52
Tableau 7. Les gradients mensuels des minima, des maxima et des moyennes des hautes altitudes de forêt.....	52
Tableau 8. Les gradients mensuels des minima, des maxima et des moyennes des basses altitudes de forêt.....	53
Tableau 9. Quotient d'Emberger.....	56
Tableau 10. Humidité de l'air durant la période 1996-2015.....	58
Tableau 11. Moyennes de vitesse de vent durant la période 1997-2015.....	59
Tableau 12. Caractéristiques des sites d'étude.....	61
Tableau 13. Variabilité des précipitations mensuelles de la zone Provence-Alpes-Côte d'Azur.....	67
Tableau 14. Répartition saisonnière des précipitations de la zone Provence-Alpes-Côte d'Azur.....	69
Tableau 15. Gradient mensuel des minima, des maxima et des températures moyennes.....	79
Tableau 16. Grille d'appréciation des unités granulométriques du sol (Duchaufour, 1991)..	83
Tableau 17. Grille d'appréciation de Matière organique dans sol (Hazelton et Murphy, 2007).....	84
Tableau 18. Grille d'appréciation de la teneur en azote (SSDS, 1993).....	85
Tableau 19. Grille d'appréciation du rapport (LCA):Laboratoire de conseils et d'analyse, 2008).....	85
Tableau 20. Grille d'appréciation de calcaire total du sol (Proposées par GEPPA in Baize, 1988).....	85
Tableau 21. Grille d'appréciation de la salinité des sols en fonction de la CE (SSDS, 1993).....	86
Tableau 22. Grille d'appréciation de la capacité d'échange cationique (Baize, 2000).....	86
Tableau 23. Grille d'évaluation des valeurs du pH du sol (SSDS :Soil Survey Division Staff, 1993).....	87
Tableau 24. Caractéristique quantitatives des peuplements.....	98
Tableau 25. Catégories de diamètre.....	102
Tableau 26. Taux de mortalité dans les stations étudiés.....	102
Tableau 27. Taux de mortalité dans les stations étudiés.....	103
Tableau 28. Degré de pressions.....	103
Tableau 29. Matrice de corrélation.....	106

Tableau 30. Résultats de l'ACP des sept axes à partir des 09 caractéristiques mesurées sur les 08 stations de la région de Djebel Ouahch.....	106
Tableau 31. Valeurs des corrélations et corrélations carrées des variables initiales avec les deux premières composantes principales.....	107
Tableau 32. Paramètres de production des peuplements de pin pignon dans la forêt de Djebel Ouach.....	110
Tableau 33. Description du Profil pédologique de la station d'El hambli.....	119
Tableau 34. Caractéristiques physico-chimiques des sols étudiés du profil N° 01.....	119
Tableau 35. Description de Profil pédologique de la station Tassinga	121
Tableau 36. Caractéristiques physico-chimiques des sols étudiés du profil N° 02.....	121
Tableau 37. Description de Profil pédologique de la station de Matlegue.....	123
Tableau 38. Caractéristiques physico-chimiques des sols étudiés du profil N° 03.....	123
Tableau 39. Description de Profil pédologique de la station de Draa nagah.....	125
Tableau 40. Caractéristique physico-chimiques des sols étudiés du profil N° 04.....	125
Tableau 41. Matrice de corrélation entre les variables morphologiques (V1).....	154
Tableau 42. Matrice de corrélation entre les variables morphologiques (V2).....	154
Tableau 43. Matrice de corrélation entre les variables morphologiques (V3).....	155
Tableau 44. Matrice de corrélation entre les variables morphologiques (V4).....	156
Tableau 45. Taux de variation des teneurs en sucres solubles pour les températures chaudes.....	163
Tableau 46. Taux de variation des teneurs en proline pour les hautes températures.....	164
Tableau 47. Taux de variation des teneurs en protéine pour les hautes températures.....	165
Tableau 48. Matrice de corrélation des principaux paramètres biochimiques mesurés.....	168
Tableau 49. Taux de variation des teneurs en sucres solubles pour les basses températures.....	172
Tableau 50. Taux de variation des teneurs en proline pour les basses températures.....	174
Tableau 51. Taux de variation des teneurs en protéines pour les basses températures.....	175
Tableau 52. Matrice de corrélation des principaux paramètres biochimiques mesurés dans les semis de Pin pignon après l'application des traitements thermiques pour les basses températures.....	177
Tableau 53. Matrice de corrélation des principaux paramètres biochimiques mesurés dans les semis de <i>Pinus pinea</i> après l'application des différents niveaux de stress hydrique.....	189
Tableau 54. Test de Newman et Keuls à 5%.....	192
Tableau 55. Test de Newman et Keuls à 5%.....	194
Tableau 56. Matrice de corrélation des principaux paramètres biochimiques mesurés après l'application de stress combiné (niveau 1).....	194
Tableau 57. Matrice de corrélation des principaux paramètres biochimiques mesurés après l'application de stress combiné (niveau 3).....	195
Tableau 58. Matrice de corrélations des variables étudiés.....	211
Tableau 59. Résultats de l'ACP des cinq axes à partir des variables mesurées.....	212
Tableau 60. Valeurs des corrélations carrées des variables initiales avec les deux premières composantes principales.....	213
Tableau 61. Groupes obtenus par l'analyse hiérarchique.....	215

Liste des figures

Figure 1. Aire de répartition géographique du Pin pignon dans le monde (Fady et al.2004)..	14
Figure 2. La superficie du Pin pignon dans les 5 wilayas (DGF IFN 2008).....	14
Figure 3. Répartition géographique des plantations du pin pignon en Algérie.....	15
Figure 4. Description détaillée des stades phénologiques de débourrement des résineux (hors mélèze) utilisés dans le réseau RENECOFOR (d'après Ulrich 1997).....	19
Figure 5. Représentation chronologique de cycle de reproduction de pin pignon (Owens et al.2006).....	23
Figure 6. Cycle reproductif de pin pignon.....	27
Figure 7. Facteurs conditionnant la réponse de la plante à un stress abiotique (d'après : Bray et al. 2000 in Touchard, 2006).....	31
Figure 8. Moyennes mensuelles des précipitations de la forêt de pin pignon (1996-2015)...	50
Figure 9. Répartition saisonnière des précipitations de la forêt de Djebel Ouahch.....	51
Figure 10. Moyennes mensuelles des températures dans les trois stations (1996-2015).....	53
Figure 11. Diagramme ombrothermique de la station de Ain El bey.....	54
Figure 12. Diagramme ombrothermique des hautes altitudes de la forêt de Djebel Ouahch...	55
Figure 13. Diagramme ombrothermique des basses altitudes de la forêt de Djebel Ouahch...	55
Figure 14. Climmagrame d'Emberger des trois stations.....	57
Figure 15. Moyenne mensuelle de l'humidité (station d'Ain El bey 1996-2015).....	58
Figure 16. Moyennes mensuelles de l'humidité maximale et minimale (1996-2015).....	58
Figure 17. Moyenne mensuelle de vent (1996-2015).....	59
Figure 18. Répartition des peuplements de pin pignon dans la région du Djebel Ouahch.....	61
Figure 19. Moyennes mensuelles des précipitations de la zone Provence-Alpes-Côte d'Azur (1991-2016).....	68
Figure 20. Moyennes annuelle et glissante des précipitations de la zone Provence-Alpes-Côte d'Azur (1991-2016).....	68
Figure 21. Répartition saisonnière des précipitations de la zone Provence-Alpes-Côte d'Azur (1991-2016).....	69
Figure 22. Moyennes mensuelles des températures dans la zone Provence-Alpes-Côte d'Azur (1991-2016).....	70
Figure 23. Variation des températures et des précipitations annuelles de la zone Provence-Alpes-Côte d'Azur.....	71
Figure 24. Phases de l'approche méthodologique.....	72
Figure 25. Etapes de la préparation du terrain.....	73
Figure 26. Représentation de l'installation des parcelles existantes dans les peuplements de Pin pignon. A: Kef lekhel ; B: El haddadj ; C: Oued leghda ; D : Matlegue ; E : Ben yakoub ; F :Tassenga ; J :Draa nagah ; H :El bier ; I :El hambli.....	75
Figure 27. Paramètres dendrométriques mesurés sur terrain: houppier (1); tronc (2).....	76
Figure 28. Triangle textural Américain système USDA (SSDS, 1993).....	83
Figure 29. La densité par classe de diamètre et stade de développement.....	99
Figure 30. La surface terrière en fonction de diamètre.....	99
Figure 31. Coefficient d'élancement (H/D) par station.....	100

Figure 32. Hauteur totale moyenne en fonction du diamètre à 1.30m des peuplements de pin pignon.....	101
Figure 33. Volume de bois des peuplements de pin pignon.....	101
Figure 34. Histogramme des valeurs propres en fonction des rangs des axes principaux pour l'ensemble des stations.....	107
Figure 35. Représentation graphique des 9 variables à l'intérieur cercle de corrélations du plan factoriel 1-2.....	107
Figure 36. Représentation graphique des 9 variables et les stations étudiées dans plan factoriel 1-2.....	109
Figure 37. Dendrogramme du regroupement des stations étudiées.....	110
Figure 38. Production fructifère des peuplements de pin pignon.....	111
Figure 39. Relation entre la densité et la production des pignes en coque.....	112
Figure 40. Relation entre production des pignes et hauteur totale	112
Figure 41. Variation du pH des sols des stations étudiées de la zone de Djebel Ouahch (Classes du pH selon SSDS, 1993).....	128
Figure 42. Variation des résultats de la densité apparente des sols des stations étudiées.....	129
Figure 43. Variation de la conductivité électrique (CE) des sols des stations étudiées (Classes de salinité selon SSDS, 1993).....	130
Figure 44. Variation de calcaire total des sols des stations étudiées (Classes du CT selon GEPPA <i>in</i> Baize, 1988).....	130
Figure 45. Variation de la capacité d'échange cationique (CEC) des sols des stations étudiées (Classes de la CEC selon Baize, 2000).....	131
Figure 46. Variation de taux de matière organique (MO) des sols des stations étudiées (Classes de la MO selon Hazelton et Murphy, 2007).....	132
Figure 47. Variation de taux d'azote (N) des sols des stations étudiées (Classes de l'azote selon SSDS, 1993).....	132
Figure 48. Variation de rapport C/N des sols des stations étudiées (Classes du ratio C/N selon LCA, 2008).....	133
Figure 49. Variation des teneurs des fractions granulométriques des sols prélevés.....	134
Figure 50. Classification des sols étudiés dans la région de Djebel Ouahch selon triangle textural Américain système USDA (SSDS, 1993).....	135
Figure 51. Corrélations entre les propriétés physicochimiques des sols étudiés.....	137
Figure 52. a: Teneur en eau moyenne (N=20), b: Taux d'humidité	142
Figure 53. Taux de germination des graines de Pin pignon.....	143
Figure 54. Variation saisonnière de la longueur de la partie aérienne au cours de l'année a: longueur mesurée en (cm) ; b: taux de croissance en (%)......	144
Figure 55. Variation saisonnière de la longueur de la partie racinaire au cours de l'année a: longueur mesurée en (cm) ; b: taux de croissance en (%)......	146
Figure 56. Variation saisonnière du rapport (LPR / LPA) des semis de pin pignon.....	148
Figure 57. a: Variation du poids frais de la partie aérienne (g), b: taux d'évolution de la biomasse de poids frais (%), des jeunes plants de pin pignon durant l'année.....	149
Figure 58. a: Variation du poids sec de la partie aérienne (g), b: taux d'évolution de la biomasse de poids sec (%), des jeunes plants de Pin pignon durant l'année.....	150

Figure 59. a: Variation du poids frais de la partie racinaire (g), b: taux d'évolution de la biomasse de poids frais (%), des jeunes plants de Pin pignon durant l'année.....	151
Figure 60. a: Variation du poids sec de la partie racinaire (g), b: taux d'évolution de la biomasse de poids sec (%), des jeunes plants de Pin pignon en fonction des saisons.....	152
Figure 61. Variation saisonnière du rapport de poids sec (PSR/PSA) des semis de pin pignon.....	153
Figure 62. Taux de chlorophylle (a et b) des aiguilles de pin pignon.....	160
Figure 63. Variation du rapport de chlorophylles des aiguilles de pin pignon.....	161
Figure 64. Teneurs en sucres solubles dans les différents organes des semis de pin pignon.....	162
Figure 65. Teneurs en proline dans les différents organes des semis de pin pignon.....	163
Figure 66. Teneurs en protéine dans les différents organes des semis de pin pignon.....	164
Figure 67. a : Teneurs en catalase, b : l'activité spécifique de la catalase au niveau des aiguilles du pin pignon.....	165
Figure 68. a: Teneurs en peroxydase, b: activité spécifique de peroxydase au niveau des aiguilles du pin pignon.....	166
Figure 69. Teneur en MDA au niveau des aiguilles du pin pignon.....	167
Figure 70. Corrélation entre les paramètres biochimiques de semis de pin pignon soumis aux hautes températures.....	169
Figure 71. Teneurs en chlorophylle (a et b) des aiguilles de pin pignon.....	170
Figure 72. Variation du rapport (chl a/b) des aiguilles de pin pignon.....	171
Figure 73. Teneurs en sucres solubles dans les différents organes des semis de pin pignon.....	172
Figure 74. Teneurs en proline dans les différents organes des semis de pin pignon.....	173
Figure 75. Teneurs en protéine dans les différents organes des semis de pin pignon.....	174
Figure 76. a: Teneurs en catalase, b: l'activité spécifique de la catalase au niveau des aiguilles du pin pignon.....	175
Figure 77. a: Teneurs en peroxydase, b: activité spécifique de la peroxydase au niveau des aiguilles du pin pignon.....	176
Figure 78. Corrélation entre les paramètres biochimiques de semis de pin pignon soumis aux basses températures.....	178
Figure 79. Teneurs en chlorophylle (a et b) des aiguilles de pin pignon pour les différents niveaux de stress hydrique.....	185
Figure 80. Variation du rapport ch.a /ch.b des aiguilles de pin pignon pour les différents niveaux de stress hydrique.....	186
Figure 81. Courbe étalon de la proline.....	187
Figure 82. Teneurs en proline des semis de pin pignon pour les différents niveaux de stress hydrique	187
Figure 83. Courbe étalon des sucres solubles.....	188
Figure 84. Teneurs en sucres solubles des semis de pin pignon pour les différents niveaux de stress hydrique.....	189
Figure 85. Corrélations entre les paramètres biochimiques de semis de pin pignon soumis au stress hydrique.....	190
Figure 86. Teneurs en chlorophylle (a et b) des aiguilles de pin pignon.....	191
Figure 87. Teneur en proline au niveau de différents organes des semis de pin pignon.....	192
Figure 88. Teneur en sucres solubles au niveau de différents organes des semis de pin pignon.....	193

Figure 89. Corrélations entre les paramètres biochimiques de semis de pin pignon (Niveau 2).....	194
Figure 90. Relation entre les variables de croissance des arbres-échantillons de pin pignon en France au cours de la période (1993-2016).....	197
Figure 91. Relation entre les variables de croissance des arbres-échantillons de in pignon dans la région de Djebel Ouahch au cours des la période (1997-2016).....	198
Figure 92. Relation entre les variables de croissance des arbres-échantillons de pin pignon en France au cours de la période (1993 – 2016), a: les basses branches ; b: les hautes branches.....	199
Figure 93. Relation entre les variables de croissance des arbres-échantillons de pin pignon dans la région de Djebel Ouahch au cours des années, a: les basses branches ; b: les hautes branches.....	199
Figure 94. Relation entre les variables de croissance pour les principales branches des arbres-échantillons de pin pignon en France au cours de la période (1993 – 2016).....	200
Figure 95. Relation entre les variables de croissance pour les principales branches des arbres-échantillons de Pin pignon dans la région de Djebel Ouahch au cours des années....	200
Figure 96. Relation entre les variables de croissance des arbres-échantillons de pin pignon en France au cours de la période (1993 – 2016), a: les rameaux forts; b: les rameaux faibles.....	201
Figure 97. Relation entre les variables de croissance des arbres-échantillons de pin pignon dans la région de Djebel Ouahch au cours des années, a: les rameaux forts; b: les rameaux faibles.....	202
Figure 98. Evolution de la longueur de pousses des arbres-échantillons de pin pignon en France au cours de la période (1993 – 2016), a: basses et hautes branches; b: branches principales, forts et faibles.....	202
Figure 99. Evolution de la longueur de pousses des arbres-échantillons de pin pignon dans la région de Djebel Ouahch au cours des années, a: basses et hautes branches; b: branches principales,forts et faibles.....	203
Figure 100. Evolution de la longueur de fleurs mâles des arbres-échantillons de pin pignon en France au cours de la période (2009 – 2016) pour les branches basses et hautes.....	204
Figure 101. Evolution de la longueur de fleurs mâles des arbres-échantillons de pin pignon en France au cours de la période (2009 – 2016) pour les principales, les faibles et les fortes branches.....	204
Figure 102. Evolution de la longueur des fleurs mâles des arbres-échantillons de pin pignon dans la région de Djebel Ouahch au cours des années, a: basses et hautes branches; b: branches principales, fortes et faibles.....	205
Figure 103. Evolution da la longueur des aiguilles des arbres-échantillons de pin pignon en France au cours de la période (2013 – 2016), a: basses et hautes branches; b: branches principales, fortes et faibles.....	205
Figure 104. Evolution de la longueur des aiguilles des arbres-échantillons de pin pignon dans la région de Djebel Ouahch au cours des années, a: basses et hautes branches; b: branches principales, fortes et faibles.....	206

Figure 105. Evolution de nombre des branches des arbres-échantillons de pin pignon en France au cours de la période (1993 – 2016) pour les basses et les hautes branches.....	206
Figure 106. Evolution de nombre des branches des arbres-échantillons de pin pignon en France au cours de la période (1993 – 2016) pour les principales, les fortes et les faibles branches.....	207
Figure 107. Evolution de nombre des branches des arbres-échantillons de pin pignon dans la région de Djebel Ouahch au cours de la période (1997-2016), a: basses et hautes branches; b: branches principales, fortes et faibles.....	207
Figure 108. Evolution de la productivité de cônes des arbres-échantillons de pin pignon en France au cours de la période (1993 – 2016) pour les basses et les hautes branches.....	208
Figure 109. Evolution de la productivité de cônes des arbres-échantillons de pin pignon en France au cours de la période (1996 – 2016) pour les principales, les fortes et les faibles branches.....	208
Figure 110. Evolution de la productivité de cônes des arbres-échantillons de pin pignon dans la région de Djebel Ouahch au cours des années, a: basses et hautes branches; b: branches principales, fortes et faibles.....	209
Figure 111. Longueur de fleurs mâles en fonction de longueur de pousses des arbres-échantillons de pin pignon au cours de la période (1993-2016).....	210
Figure 112. Nombre des futures branches en fonction de longueur de pousses des arbres-échantillons de pin pignon au cours de la période (1993-2016).....	210
Figure 113. Nombre de cônes en fonction de longueur de pousses des arbres échantillons de Pin pignon au cours des années (1993-2016).....	211
Figure 114. Histogramme des valeurs propres en fonction des rangs des axes principaux...	212
Figure 115. Représentation graphique des variables étudiées dans plan factoriel 1-2.....	214
Figure 116. Dendrogramme du regroupement des années étudiées.....	215

Liste des photos

Photo 1. Peuplement de pin pignon (Station Ben Yakoub, Djebel Ouahch) (2015).....	6
Photo 2. a: Ecorce et aiguilles de pin pignon (2014).....	6
Photo 3. Bourgeons de pin pignon (2014).....	7
Photo 4. a: Cônes et graines de pin pignon (2015).....	7
Photo 5. Stade recherché pour les pins (bourgeons très longs et les aiguilles basses).....	19
Photo 6. Pin pignon, a: Cônes males; b: Cônes femelles.....	25
Photo 7. Forêt dense de pin pignon (El Hambli- Djebel Ouahch) (2015).....	36
Photo 8. Elagage de pin pignon à la tronçonneuse.....	38
Photo 9. Peuplements de pin pignon de la forêt de Kef lekhel (2014).....	62
Photo 10. Peuplements de pin pignon de la forêt de Draa Nagah (2014).....	63
Photo 11. Peuplements de pin pignon de la forêt El bier (2014).....	63
Photo 12. Peuplements de pin pignon de la forêt de Tassenga (2015).....	64
Photo 13. Peuplements de pin pignon de la forêt de Ben yakoub (2015).....	64
Photo 14. Peuplements de pin pignon de la forêt d'El Hambli (2015).....	65
Photo 15. Cône de Pin pignon (2015).....	80
Photo 16. a: séchage des cônes, b: poids des cônes, c: extraction des graines (2015).....	80
Photo 17. Semis de pin pignon après une année de culture en milieu naturel (Février, 2015).....	89
Photo 18. Semis de pin pignon (2014).....	90
Photo 19. Chambre de culture : Semis de pin pignon.....	91
Photo 20. A : Thermo hygromètre à sonde métallique, B : Semis de pin pignon stressé au niveau N3= 35%.....	91
Photo 21. Prélèvement des échantillons arbres et branches de pin pignon (France, 2016).....	93
Photo 22. Les axes dans les branches de pin pignon (France, 2016).....	94
Photo 23. Mesures sur les branches de pin pignon (Irstea -Centre d'Aix-en- Provence, 2016).....	95
Photo 24. Agrandir les branches faibles pour les mesures (Irstea– Centre d'Aix–en- Provence, 2016).....	95
Photo 25. Productivité des cônes et des branches de pin pignon (Irstea – Centre d'Aix –en- Provence, 2016).....	96
Photo 26. Mesures sur les branches de pin pignon (Constantine, 2016).....	97
Photo 27. Régénération naturelle de pin pignon.....	103
Photo 28. Coupes illicites des peuplements de pin pignon (Draa nagah).....	104
Photo 29. Chablis et les morts sur pieds des peuplements de Pin pignon (Matlegue).....	104
Photo 30. Pathologie du feuillage (Champignons de Sphaeropsis sapinea).....	105
Photo 31. Incendie des peuplements de pin pignon.....	105
Photo 32. Station d'El hambli.....	120
Photo 33. Profil pédologique N° 1.....	120
Photo 34. Station Tassenga.....	122
Photo 35. Profil pédologique N° 2.....	122
Photo 36. Station Matlague.....	124
Photo 37. Profil pédologique N° 3.....	124

Photo 38. Station Draa Nagah.....	126
Photo 39. Profil pédologique N° 4.....	126
Photo 40. Semis de pin pignon après une année de croissance (2015).....	145
Photo 41. Semis de pin pignon après une année de croissance (2015).....	145
Photo 42. Semis de pin pignon après une année de croissance (2015).....	147
Photo 43. Semis de pin pignon après une année de croissance (2015).....	147
Photo 44. Semis de pin pignon dans les différents volumes de sol après une année de croissance (2015).....	149

SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	1
--------------------------	----------

CHAPITRE I. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

1. Données générales sur le pin pignon.....	4
1.1. Classification botanique.....	4
1.2. Caractéristiques morphologiques et anatomiques.....	5
2. Ecologie de pin pignon.....	8
2.1. Encadrement phytoclimatique.....	8
2.2. Tempérament.....	8
2.3. Substrat	10
3. Aire de répartition géographique	11
3.1. Aire d'origine.....	11
3.2. L'aire de diffusion actuelle.....	12
3.3. Répartition en Algérie	14
4. Phénologie.....	16
4.1. Débourrement et période de végétation	18
4.2. La phénologie comme indicateur du changement climatique.....	21
4.3. Croissance et production de biomasse	21
4.4. Fructification et reproduction.....	23
4.5. Organe de reproduction et production des graines.....	24
4.6 Biologie de la germination.....	27
4.7. Utilisation.....	28
5. Ecophysiologie.....	29
5.1. Adaptation aux conditions extrêmes de température.....	29
5.1.1. Effet des hautes températures sur les végétaux	30
5.1.2. Effet des basses températures sur les végétaux.....	31
5.2. Réponses des plantes au stress hydrique.....	32
6. Sylviculture et amélioration de Pin pignon.....	33
6.1. La structure des peuplements	33
6.2. Les pinèdes destinées à la production de graines pour la consommation.....	36
6.3. La plantation d'arbres pour la production de pignes.....	39
6.4. Les caractéristiques et emplois du bois de pin pignon.....	40
6.5. La récolte des cônes.....	41

CHAPITRE II. PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

I. Zone de Djebel Oauhch	42
1. Situation géographiques.....	42
1.1. La topographie.....	44
1.2. La géologie.....	44
1.3. La géomorphologie	45
1.4. La pédologie.....	46

2. Étude climatique	47
2.1. Correction des précipitations	48
2.2. Correction des températures.....	51
2.3. Synthèse Bioclimatique.....	54
2.3.1. Diagramme ombrothermique.....	54
2.3.2. Etages bioclimatiques d'Emberger.....	55
2.4. Humidité atmosphérique.....	57
2.5. Vents.....	59
3. Sites d'étude	60
II. Zone de Provence-Alpes-Côte d'Azur « France»	66
1. Situation géographique.....	66
2. La géologie.....	67
3. Le climat.....	67
3.1. Précipitation.....	67
3.2. Température.....	69

CHAPITRE III. MATERIEL ET METHODES

1. Echantillonnage et installation des placettes	72
1.1. Approche méthodologique.....	72
1.1.1. Préparation du terrain.....	73
1.1.2. Mesures dendrométriques.....	76
1.2. Traitement et analyse des données.....	77
1.3. Sylviculture et production en cônes et graines.....	79
2. Etude pédologique	81
2.1. Réalisation de profil pédologique.....	81
2.2. Analyses physico-chimiques du sol.....	82
3. Etude morphologique	87
3.1. Teneur en eau	87
3.2. Techniques de culture et germination.....	87
3.3. Paramètres morphologiques	88
4. Traitements thermiques et hydriques	89
4.1. Stress thermique.....	89
4.2. Stress hydrique.....	90
4.3. Stress combiné.....	91
4.4. Méthodes de dosage des paramètres biochimiques.....	92
5. Etude phénologique et croissance	92
5.1. Arbres-échantillons.....	92
6. Etude statistique	97

CHAPITRE IV. RESULTATS ET DISCUSSION

1. Caractéristiques dendrométriques des placettes-échantillons de pin pignon.....	98
1.1. Relations entre les différents paramètres mesurés.....	98
1.1.1. Densité et dominance.....	98
1.1.2. Coefficient d'élançement ou la stabilité.....	100
1.1.3. Contenance (volume).....	101
1.1.4. Potentiel exploitable.....	102
1.1.5. Taux de mortalité.....	102
1.1.6. Taux de régénération.....	102
1.1.7. Analyse des pressions et menace.....	103
1.1.8. Analyse en composantes principales (ACP) et hiérarchique (CAH).....	105
1.2. Production des cônes et des pignes.....	110
1.3. Discussion.....	113
1.3.1. Structure des peuplements de Pin pignon dans la région de Djebel Ouahch.....	113
1.3.2. Production des cônes et de pignes des peuplements de Pin pignon.....	115
2. Caractérisation physico-chimique du sol.....	119
2.1. Le potentiel hydrique pH (eau) et le pH (kcl).....	127
2.2. La densité apparente D(a).....	128
2.3. La conductivité électrique (CE).....	129
2.4. Le calcaire total (CaCO ₃).....	130
2.5. La capacité d'échange cationique (CEC).....	131
2.6. La matière organique (MO).....	131
2.7. L'azote total (N).....	132
2.8. Le rapport (C/N).....	133
2.9. La texture.....	133
2.10. Relation entre les paramètres physico-chimiques des sols étudiés.....	136
2.11. Discussion.....	138
3. Effet des variations thermiques saisonnières sur les paramètres morphologiques....	142
3.1. Teneur en eau.....	142
3.2. Capacité germinative des graines.....	142
3.3. Mesures morphologiques.....	144
3.3.1. Evolution de longueur de la partie aérienne (LPA).....	144
3.3.2. Evolution de longueur de la partie racinaire (LPR).....	146
3.3.3. Rapport longueur partie racinaire/longueur partie aérienne (LPR/LPA).....	148
3.3.4. Poids frais et sec de la partie aérienne (PFA), (PSA).....	149
3.3.5. Poids frais et sec de la partie racinaire (PFR), (PSR).....	151
3.3.6. Rapport matière sèche partie racinaire/matière sèche partie aérienne (PSR/PSA).....	152
3.3.7. Corrélation entre les paramètres morphologiques.....	153
3.4. Discussion.....	156
4. Réponses physiologiques du Pin pignon aux stress thermique, hydrique et combiné.....	160
4.1. Stress thermique aux températures extrêmes.....	160
4.1.1. Hautes Températures.....	160
4.1.1.1. Chlorophylle.....	160
4.1.1.2. Sucres solubles.....	162
4.1.1.3. Proline.....	163
4.1.1.4. Protéines.....	164

4.1.1.5. Catalase et activité spécifique de la catalase.....	165
4.1.1.6. Peroxydase et activité spécifique de la peroxydase.....	166
4.1.1.7. Malonedialdéhyde (MDA).....	167
4.1.1.8. Corrélation entre les variables étudiés.....	168
4.1.2. Basses Températures.....	170
4.1.2.1. Teneurs en chlorophylle.....	170
4.1.2.2. Teneurs en sucres solubles.....	172
4.1.2.3. Teneurs en proline.....	173
4.1.2.4. Teneurs en protéines.....	174
4.1.2.5. Teneurs en catalase et activité spécifique de catalase.....	175
4.1.2.6. Teneurs en peroxydase et activité spécifique de peroxydase.....	176
4.1.2.7. Corrélations entre les variables étudiées.....	177
4.1.3. Discussion.....	179
4.2. Stress hydrique.....	185
4.2.1. Teneurs en chlorophylle.....	185
4.2.2. Teneurs en proline.....	186
4.2.3. Teneurs en Sucres soluble.....	188
4.2.4. Corrélations entre les variables étudiées.....	189
4.3. Stress combiné (hydrique et thermique).....	191
4.3.1. Teneur en chlorophylle.....	191
4.3.2. Teneurs en proline.....	191
4.3.3. Teneurs en sucres solubles.....	193
4.3.4. Corrélations entre les variables étudiées.....	194
4.3.5. Discussion.....	195
5. Architecture et adaptation phénologique du Pin pignon au changement climatique.....	197
5.1. Observations sur la croissance.....	197
5.1.1. Longueur de pousses.....	202
5.1.2. Longueur de fleurs mâles.....	203
5.1.3. Longueur d'aiguilles.....	205
5.1.4. Nombres de branches.....	206
5.1.5. Nombres de cônes.....	208
5.2. Relations entre les différents paramètres de croissance étudiés.....	211
5.3. Discussion.....	216
CONCLUSION GENERALE.....	219
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	
ANNEXES	

Introduction

Le climat Algérien de type méditerranéen est caractérisé par une irrégularité qui se manifeste par la perturbation des régimes pluviométriques. Les projections des précipitations et des températures aux horizons de 2020 et 2050 pour la méditerranée prévoient une baisse plus importante des précipitations et une augmentation de températures moyennes (Gracia, 2006 in Rego, 2006).

Le Pin pignon (*Pinus pinea* L.) est l'une des essences caractéristiques de la flore méditerranéenne. Sa superficie totale dans le monde est estimée à 600 000 ha dont plus de 400 000 ha sont situés en Espagne. Il se trouve à l'état pur ou mélangé avec du Pin maritime (*Pinus pinaster*) ou certaines espèces d'arbustes telles que genévrier (*Juniperus*), et chêne (*Quercus*) (Barbeito, 2009). Cette espèce est utilisée depuis l'antiquité en raison de son importance économique, principalement production de bois et de pignes (Moussouris et Rigato, 1999; Calama et al. 2003) largement appréciées dans les pâtisseries (Calama et Montero 2007) dont plus de 60% de la production mondiale (bois-pignes) est assurée par l'Espagne (Barbeito, 2009).

En Algérie, le pin pignon est une essence forestière présente sous forme de reboisement, Il occupe une superficie totale de 3506 ha, la plus grande surface se trouve dans le massif de Djebel Ouahch (2278 ha) à l'est de la ville de Constantine à des altitudes variant entre 900 et 1100 mètre, où elle mérite d'être mieux valorisée, pour son intérêt économique, de sa production de pignes et de son bois, malgré que ce dernier soit beaucoup plus nouveau que le pin d'Alep ou le Pin maritime. C'est une essence qui est parfois considérée comme arbre fruitier pour la rentabilité de ses fruits.

La régénération naturelle de cette espèce, comme d'autres espèces méditerranéennes, est confrontée à de sérieux problèmes et par conséquent, elle est difficile à atteindre (Calama et Montero, 2007). La première étape à réaliser, en vue de l'adoption d'une stratégie sylvicole adéquate pour la conservation et le renouvellement de cette espèce, est la compréhension et la quantification des facteurs contrôlant ce processus.

La fructification de Pin pignon commence dès l'âge de 15 à 20 ans, mais la production de graines n'est abondante que tous les 3 ou 4 ans seulement (parfois 5 ou 6). La reproduction débute vers l'âge de 8 à 20 ans selon les peuplements (Veechi, 1980). La fécondation a lieu en avril de la seconde année. La maturité du fruit, sa déhiscence et la chute des graines ont lieu en septembre de la troisième année. La production des cônes et de pignes représente le principal intérêt des pinèdes de Pin pignon. La production dépend des facteurs stationnelles,

de l'origine des peuplements, l'âge des arbres, le milieu, la densité, les traitements, les élagages, les modalités de régénération, et l'état sanitaire.

L'aménagement des pinèdes à vocation de production de pignes est conçu de manière à optimiser la production de pignes, tout en la rendant compatible avec celle de bois. Dans les pinèdes du domaine public, on favorise la production mixte bois et pignes. Les deux traitements prévoient, à la fin du cycle, la coupe à blanc suivie de replantation.

La récolte des cônes est faite en hiver ou au printemps par des ouvriers spécialisés, qui grimpent dans les arbres à l'aide de crampons ou d'échelles. Ils provoquent la chute des cônes mûrs de l'arbre à l'aide de perches crochues. Le séchage des cônes se fait en plein air, en cas, ou dans des entrepôts où ils restent jusqu'à l'été: ils sont alors exposés au soleil, ce qui provoque leur ouverture. L'extraction des pignes peut être faite à la main ou mécaniquement, au moyen de dessiccateurs-trieurs (Gradi, 1961). Les pignons criblés sont commercialisés pour la graine, ou pour un traitement industriel ultérieur. Cônes et coques sont utilisés pour le chauffage.

Le Pin pignon a un bois de cœur jaune rougeâtre et un aubier blanc rosé avec des cernes distincts et généralement d'une certaine épaisseur; ce bois, tendre, à fil assez droit, a une texture moyenne à grossière; la présence de bois de compression est fréquente dans les fûts courbés par le vent. Les nœuds sont gros. La fibre est plutôt droite. Le bois est abondamment résineux et contient des poches de résine. Le bois de pin pignon est principalement employé pour les pilotis, le bois de mine, la charpente, le sciage pour menuiserie grossière et emballages, la laine de bois, la trituration pour les panneaux, la pâte à papier ou la cellulose. Grâce à sa bonne résistance à l'humidité, le bois de Pin pignon est employé, surtout en Espagne et en Italie, dans la construction de bateaux (Giordano, 1990).

La nature et la périodicité des coupes éclaircies et des élagages sont des éléments caractéristiques de l'aménagement des pinèdes équiennes de pin pignon. Les éclaircies commencent à l'âge de 8 à 10 ans et sont répétées tous les 4 ou 5 ans, avec une intensité variable selon la densité initiale du peuplement.

Dans des conditions de milieu et de densité favorables, le pin pignon peut atteindre une hauteur de 25 à 30 m, avec un fût sans branches de 12 à 15 m (Pavari, 1955; Ciancio et al. 1986). Le Pin pignon cicatrise bien les plaies d'élagage. Néanmoins il est préférable d'intervenir pendant la période de repos de la végétation, afin d'éviter le risque de dégâts dus à des parasites.

Aussi, le greffage des arbres destinés à la production de pignes permet de hâter le début de la production (d'où une meilleure rentabilisation des investissements) et de résoudre, en partie, le problème de la rareté de la main-d'oeuvre pour la récolte des cônes (arbres moins hauts). On procède au greffage lorsque les porte-greffes ont 2 à 4 ans; les greffons sont prélevés sur des individus sélectionnés pour leurs performances de production de pignes.

Les greffes ont été effectuées à Valladolid et à Badajoz, et il existe aujourd'hui presque 30 ha de plantations de Pin pignon greffé sur Pin pignon; ces plantations ont été implantées dans d'excellentes conditions de milieu, sur des sols ardoisiers; les densités varient de 200 à 250 tiges/ha, (Catalan bachiller, 1989). Sur des sols argileux, marneux ou gypseux, le greffage a été réalisé sur porte-greffe de Pin d'Alep, mieux adapté à ces sols que d'autres pins.

Dans ce contexte, Ce travail de thèse est un thème d'actualité qui vent répondre aux préoccupations de la conservation des forêts de Constantine, pour étendre les plantations de cette essence dans la zone concernée en s'assurant de son adaptation sur le plan climatique, édaphique et sa productivité en pignes sur le plan économique.

Notre travail consiste à étudier et développer les points suivants :

- Caractérisation dendrométrique des peuplements (âge, diamètre, hauteur, volume du bois, densité du peuplement...);
- Productivité des peuplements (production des cônes et des pignes);
- Caractérisation physico-chimique des sols de la zone d'étude;
- Adaptation des semis aux stress thermique et hydrique par des marqueurs biochimiques et enzymatiques;
- Etude phénologique (croissance et fructification).

1. Données générales sur le Pin pignon (*Pinus pinea* L.)

Le Pin pignon (*Pinus pinea* L.), est un arbre qui peut atteindre 25 à 30 mètres dans les stations favorables cependant il peut dépasser les 30 mètres sur les sols frais, profonds et fertiles (Seigue, 1985). C'est une espèce qui présente une silhouette très caractéristique à tous les âges. Les jeunes pins ont un port en boule qui est pratiquement unique (Alexandrain, 1986). A l'état adulte la croissance en hauteur diminue, alors que les branches maitresses continuent à s'allonger latéralement, donnant ainsi à l'arbre son aspect typique en parasol (Loullou, 1987).

Le Pin pignon présente un intérêt de plus en plus grandissant, non seulement en raison de sa rusticité, sa différence vis-à-vis la nature chimique du sol, son système racinaire très développé, son bois de qualité, mais surtout à sa fructification qui fait l'objet de transactions commerciales annuelles dont la valeur dépassent de loin dans certain cas celle de la production ligneuse.

1.1. Classification botanique

Parmi les pins méditerranéens, le pin pignon est considéré comme une espèce isolée et difficile à classifier d'un point de vue taxonomique. Son incompatibilité au croisement avec tous les autres pins est bien connue et en est la preuve (Mirov, 1967).

Debazac (1977), divise le genre *Pinus* en deux sous-genres : *Strobus* et *Pinus*. Le sous-genre *Pinus* est à son tour divisé en 6 sections dont la section *Pinea* comprenant uniquement l'espèce *Pinus pinea* L. Cet auteur signale que certains caractères comme la graine à coque dure, à aile courte, les trachéides transversales à parois minces et sans ornementation rapprochent cette espèce des pins de la section Panyans. Cependant, les bractées et écailles des cônes ou euphylls décurrentes et les cônes à maturation trisannuelle justifient son classement distinct.

Gaussen (1960), classe *Pinus pinea* dans la sous-section *Cembroïdes* de la section qu'il nomme *Parryanoïdes*.

Enfin, Little et Critchfield (1969) considèrent cette espèce comme la seule qui appartienne à la sous-section *Pineae* de la section *Ternatae* Loud., sous-genre *Pinus*.

La position taxonomique du pin pignon :

Classification (APG III)

- **Régne :** *Plantae*
- **Division :** *Pinophyta*
- **Classe :** *Pinopsida*
- **Sous-famille :** *Pinoideae*
- **Genre :** *Pinus*
- **Nom binominal :** *Pinus pinea l.*

Classification phylogénétique

- **Ordre :** *Pinales*
- **Famille :** *Pinaceae*

Néanmoins, il existe une variété de pin pignon appelée <fragilis> qui produit des graines à coque fragile. Les différences entre les graines à coque fragile et celles à coque normale concernent leurs dimensions et leur poids. Les premières sont couvertes d'une poudre noire qu'on peut difficilement enlever (Ammannati, 1989 et Ciancio, 1994). Une autre forme ornementale naine, *Pinus pinea* var. *correvoniana* Hornib, a été également signalée par (Vidakovic, 1991 et Mirov, 1967) considère *Pinus pinea* comme une espèce isolée des autres espèces méditerranéennes et difficile à classer vu son incompatibilité au croisement avec tous les autres pins.

1.2. Caractéristiques morphologiques et anatomiques

Arbre à port typiquement "en parasol", le pin pignon peut atteindre 30 m de haut et plus de 6m de circonférence. Cylindrique et se divise rapidement en branches d'importance presque égale. Chez les jeunes arbres, le houppier est globulaire; ultérieurement, les extrémités des branches latérales atteignent la partie supérieure de la couronne, lui conférant son port particulier. Les arbres perdent les branches les plus basses par élagage naturel.

De croissance lente, sa longévité est d'environ 200 à 250 ans, atteignant parfois 400 ans dans certaines régions comme l'avaient signalé Gonzales Vasquez (1947) et Feinbrun (1959).



Photo 1. Peuplement de pin pignon (Station Ben Yakoub, Djebel Ouahch) (2015)

La croissance est monocyclique avec les rameaux primaires d'un gris verdâtre. Le rhytidome, initialement écailleux est brun rouge, devient crevassé et se divise en grandes et longues plaques, d'un gris assez clair de couleur rouge cannelle à l'intérieur (Photo 2, a).

Les aiguilles, d'un vert glauque, réunies sur les rameaux sont généralement fasciculés par deux, longues de 10 à 20 cm et épaisses de 1,5 à 2 mm. Flexibles et dentelées, avec un apex pointu souvent jaunâtre, elles tombent la 3^{ème} ou la 4^{ème} année (Photo 2, b).



Photo 2. a: Ecorce et aiguilles de pin pignon (2014)

Les bourgeons sont cylindriques, pointus avec des écailles réfléchies, d'un brun clair, frangées de blanc ; ils ne sont pas résineux. Les arbres, monoïques, forment des inflorescences cylindriques. L'époque de floraison est comprise entre mai et juin (Photo 3).



Photo 3. Bourgeons de pin pignon (2014)

Les cônes sont solitaires (rarement réunis par 2 ou 3), arrondis, ovoïdo-coniques, de 8 à 14 cm de long et de 7 à 10 cm de large. Ils possèdent des écailles en écusson renflé, à ombilic peu saillant (Photo 4, a). Les graines, grosses à coque ligneuse sont groupées par deux à la base de chacune des écailles (Photo 4, b).

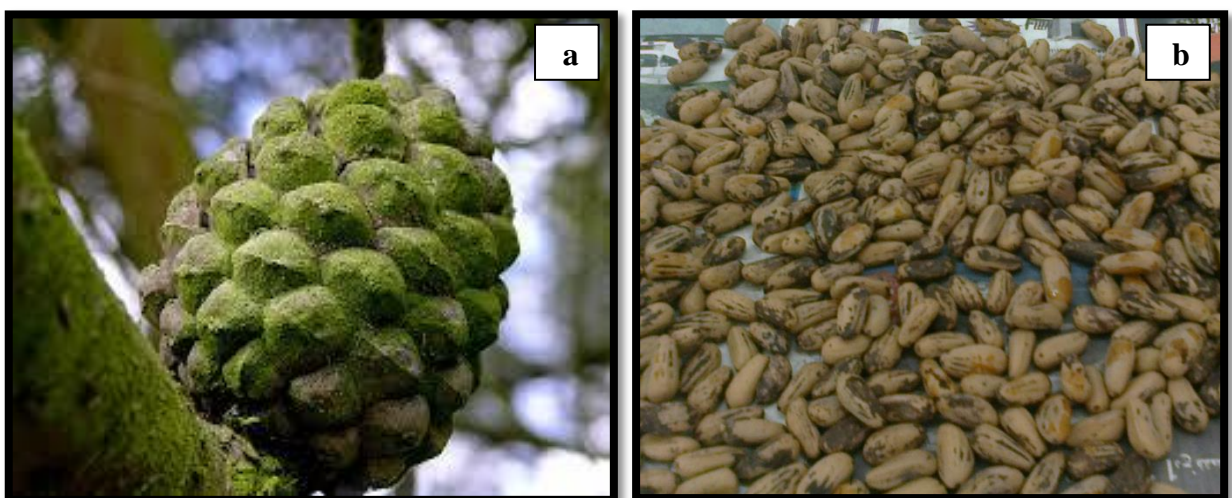


Photo 4. a: Cônes et graines de pin pignon (2015)

Le système racinaire du pin pignon, poussant sur des sols sableux, comprend d'abord un pivot avec peu de racines latérales ; ces dernières colonisent les couches superficielles du sol avec un développant horizontal. Ces racines latérales se subdivisent plus ou moins dichotomiquement donnant finalement naissance à un ample système d'exploration du sol, complexe et multistratifié (Filigheddu, 1962; Padula, 1979; Profili, 1993).

2. Ecologie de pin pignon

2.1. Encadrement phytoclimatique

Selon la classification d'Emberger, l'aire de diffusion de pin pignon comprend les bioclimats humide et sub-humide des types tempéré et froid (Quezel, 1979). La croissance est moindre dans les bioclimats semi-arides (tel celui de l'Alentejo, du centre et sud-est de l'Algarve) et dans les types froids et très humides des montagnes du nord et du centre du Portugal.

Le pin pignon est une essence qui demande un ensoleillement pour assurer une bonne fructification (Seigue, 1985). Il se rencontre dans les étages bioclimatiques humides, subhumides à variante tempérée chaude (Quezel, 1980). Selon Boisseau, 1993 les basses températures combinées à l'humidité seraient néfastes sur les houppiers. Il arrive à supporter les grands froids exceptionnels (-20°C) en Espagne et (-10°C à -15°C) en France (Alexandrian, 1979).

2.2. Tempérament

Le Pin pignon est une espèce thermophile, relativement xérophile et héliophile, bien que ses exigences puissent être atténuées dans les peuplements irréguliers (Ciancio et al. 1986). Selon Pavari (1954) la diffusion de *P. pinea* est liée au climat chaud et lumineux des côtes méditerranéennes, dont cette espèce ne s'éloigne pas beaucoup.

Le Pin pignon est une espèce exigeante quant à la température, supporte relativement la sécheresse, et elle est très exigeante en lumière. Sa diffusion est en effet liée au climat chaud et lumineux des côtes méditerranéennes (Sbay, 2007).

Les limites thermiques en Italie sont les suivantes: température moyenne annuelle: 10 à 11°C; température moyenne du mois le plus froid: 1 à 2°C; température moyenne minimum: non inférieure à -10°C (De Philippis, 1957).

En France, la température moyenne annuelle varie entre 10 et 18°C; la température moyenne minimum du mois le plus froid varie de -2 à 7°C; la moyenne des températures

maximales du mois le plus chaud oscille entre 27 et 32°C. La pluviosité annuelle peut atteindre 1500 mm, avec une période sèche variable de 2 à 4 mois (Cemagref, 1987).

En Espagne, dans la Meseta de la Castille et du Léon, la température moyenne oscille entre 11 et 12,4°C. La moyenne des minima de température du mois le plus froid varie de 1 à 4°C, la température moyenne des maxima du mois le plus froid est comprise entre 2 et 9°C, la moyenne des maxima du mois le plus chaud varie de 38 à 41°C. Les précipitations moyennes varient au cours de l'année de 390 à 600 mm. Leur distribution montre deux maxima: au printemps (mars) et en automne (novembre), ce dernier étant supérieur au premier. Les minima ont lieu en été (août) et en hiver (janvier). L'humidité de l'air varie de 60 à 70% (Montero, 1989).

En région méditerranée, il exige une température annuelle, égale à 13.5°C, et la température moyenne de la saison de végétation égale 18°C, par contre en Corse la moyenne annuelle est égale à 14.6°C et la température moyenne de la saison de végétation égale à 18.8°C (IFN, 2001).

Donc, il se rencontre dans les limites thermiques correspondant aux valeurs suivantes :

- Température moyenne annuelle de 10 à 18°C ;
- Température moyenne minima (m) du mois le plus froid (-2°C à 7°C) ;
- Température moyenne maxima (M) du mois le plus chaud (27°C à 32°C).

L'espèce est surtout sensible aux minima absolus de température dont l'intensité des effets varie avec la latitude, l'exposition, la distance à la mer, la période à laquelle ils se produisent et l'état physiologique des arbres (Giordano, 1967). L'humidité atmosphérique élevée aggrave, les effets négatifs des basses températures, et elle peut engendrer le rougissement des pousses ainsi que le dessèchement d'une grande surface de la pinède.

Le Pin pignon peut se développer dans des régions où les précipitations comprises entre 550 et 1500 mm/an au sens de Gaussen, cité par Labadie, (1983). Il peut supporter une période de sécheresse de 3 à 4 mois : l'émission d'un très long pivot aux premiers stades de son développement lui permet d'atteindre l'humidité des couches les plus profondes du sol.

Le houppier intercepte 28% de la pluie qui se subdivise en deux fractions : 97% se répartit très uniformément sur le sol par égouttement à travers le houppier et 3% s'écoulent le long du fût. Cette seconde voie de passage de la pluie à travers le peuplement assure au sol près de la souche une alimentation hydrique supérieure. C'est un arbre qui ne supporte pas la charge de la neige sur la cime (Rapp et Ibrahim, 1978).

❖ **Evapotranspiration**

La transpiration d'un peuplement naturel de *Pinus pinea* a été étudiée en 1978 sur le littoral méditerranéen français en utilisant de l'eau marquée au tritium (Cabanettes et Rapp, 1978; Ibrahim et al. 1979; Ibrahim et al. 1980). Le peuplement étudié, âgé de 35 ans environ, compte 800 tiges à l'hectare, dont le diamètre moyen est de 20,2 cm (Ibrahim et Rapp, 1979). Il est établi sur un régosol peu évolué, formé à partir de dépôts sableux éoliens, avec nappe phréatique faiblement salée, oscillant entre 1 et 1,5 m de profondeur. L'extrémité des pivots des pins atteint cette nappe.

La transpiration journalière moyenne a été de 3,1 mm et de 3,9mm en avril et octobre, de 5,2 mm et de 6 mm en mai et juin, mois qui sont respectivement des mois au cours desquels la transpiration est faible ou forte. Pendant la même période, l'évapotranspiration réelle (ETR), déterminée à partir des fluctuations journalières du niveau de la nappe, s'est élevée à 1.044 mm, tandis que l'évapotranspiration potentielle (ETP), calculée en tenant compte de la correction proposée par RUTTER pour les écosystèmes forestiers, correspond à 1.128 mm. Le rapport entre la valeur de l'ETP calculée pour les sept mois de la saison de végétation et l'ETP annuelle est de 69%, 74% et 80% respectivement pour les trois années d'observations: 1976, 1977 et 1978 (Ibrahim, 1979).

Sur un plan général, le rythme d'absorption des éléments nutritifs par les arbres de 15 à 35 ans suit de près celui de la croissance des différents organes de l'arbre (Rapp, 1984): novembre, décembre et janvier sont des mois caractérisés par une absorption très faible, tandis qu'en février le début de l'élongation du fût et des branches correspond à une augmentation significative de l'absorption qui se poursuit jusqu'en juin, époque de la naissance des nouvelles aiguilles. En juillet, la sécheresse provoque une réduction de l'absorption, d'où une interruption ou un ralentissement de la production ligneuse. Enfin, d'août à octobre, il y a une reprise de cette production, correspondant à une augmentation de l'absorption des éléments nutritifs du sol, mais la cadence de cette absorption est inférieure à celle du printemps.

2.3. Substrat

Le Pin pignon affectionne essentiellement les substrats sableux et les roches siliceuses friables. Il apparaît également sur les dolomies et sur les arènes dolomitiques (Quézel, 1980). En général, il préfère des terrains sableux et frais pouvant contenir jusqu'à 30% de calcaire ce qui explique sa large diffusion sur les dunes littorales et son utilisation dans leur fixation (Poupon, 1970).

Djaziri (1971) a constaté qu'en Italie méridionale, cette essence est frugale, supportant les sols calcaires, les sols lourds et même ceux présentant des tâches de pseudogley. Il refuse uniquement les sols marécageux, compacts ou excessivement argileux (Pavari 1931, 1954).

Les études de Mancini (1954, 1956) sur les sols de quelques pinèdes italiennes ont confirmé le caractère relativement frugal du Pin pignon et sa capacité de bien se développer même sur des sols sablo-calcaires subcalcaires. On trouve même des peuplements artificiels établis sur des calcaires blancs et havane du Crétacé - Paléocène dans le cadre de l'aménagement hydraulique de bassins versants dans les Monts Aurunci (Latium) (Giacomini et al. 1978; Hermanin et Paoletti, 1992).

Les caractéristiques physiques du sol revêtent une plus grande importance que les caractéristiques chimiques. Indifférent au pH (compris entre 4 et 9), il supporte jusqu'à 50% de calcaire total et jusqu'à 15% de calcaire actif (Cemagref, 1987).

3. Aire de répartition géographique

3.1. Aire d'origine

L'aire d'origine du pin pignon n'est pas définissable avec certitude. Il estime généralement qu'il est presque impossible de distinguer les stations d'origine des stations d'introduction, en raison de la considérable diffusion de l'espèce dans le temps (Rikili, 1943 ; Francini, 1958).

Pour Fenaroli et Gambi (1976), l'espèce est méditerranéenne par excellence: son aire d'origine s'étend de la Crimée au Portugal et à l'Algérie. Selon Debazac (1977), la diffusion est liée au pourtour méditerranéen: du Portugal jusqu'à la Syrie, où l'espèce est cultivée depuis des temps immémoriaux pour la production de pignes et pour l'approvisionnement des arsenaux maritimes.

Rikili (1943) en accord avec Eig (1931), soutient que l'aire d'origine se trouve dans le bassin méditerranéen occidental en particulier dans la Péninsule Ibérique où se trouvent les peuplements naturels les plus étendus, et où il atteint l'altitude la plus élevée au dessus du niveau de la mer. Selon Boudy (1950), le Pin pignon n'est nulle part indigène dans le Nord de l'Afrique; cette absence, toutefois, ne s'explique pas facilement, étant donnée sa diffusion dans la Méditerranée occidentale et la présence en Afrique du Nord de toutes les autres espèces euroibériques.

Pour Pavari, (1955), l'indigénat du pin pignon est certain dans le secteur oriental de la Méditerranée, de la Crète à l'Asie Mineure. Firat (1943) in Pavari (1955), le signale, en Turquie, dans la région de Smyrne. Mirov (1967) estime, tout en signalant les doutes exprimés par Rikli à ce sujet, que les peuplements qui se trouvent de part et d'autre de la frontière russo-turque, à une altitude comprise entre 150 et 600m, pourraient être d'origine naturelle. Selon Walter (1968), les pinèdes poussant le long des côtes du golfe d'Antalya, devant l'île de Chypre, seraient spontanées.

La répartition géographique du Pin pignon semble être soumise à l'impact humain vu son importance économique. En effet, cette espèce anciennement nommée *Pinus domestica* a été largement plantée pour la production des graines autour de la Méditerranée tout au long des temps historiques par les Grecs, les Romains et les Arabes.

3.2. L'aire de diffusion actuelle

L'aire de diffusion de Pin pignon comprend la région méditerranéenne septentrionale, de la péninsule Ibérique à l'Anatolie jusqu'aux côtes méridionales de la mer Noire, où, dans certains secteurs, l'espèce est probablement indigène (Rikli, 1943; Critchfield et Little, 1966).

La superficie totale couverte par le pin pignon dans le monde est estimée à 600 000 ha (75 % en Espagne, 9 % au Portugal, 8 % en Turquie, 7 % en Italie, 0.5 % au Maroc et le reste en Grèce, Liban, Tunisie et en France) (Seigue, 1985) (Figure 1).

En Afrique du nord, le *Pinus pinea* L. n'existe pas actuellement à l'état spontané. Toutefois, cette absence ne s'explique pas facilement, étant donné sa diffusion dans la méditerranée occidentale et la présence en Berbérie de toutes les autres espèces euro-ibériques (Sbay, 2000).

L'introduction du Pin pignon en Afrique du nord est relativement récente. Certains auteurs n'excluent pas l'hypothèse de sa présence dans le passé à l'état spontané (Pavari, 1955; Feinbrun, 1959).

- **En Tunisie**, le pin pignon occupe actuellement 20000 ha environ sur les dunes littorales, dans les subéraies dégradées et dans le maquis (Aloui, 1988). Il a été utilisé pour la première fois en 1904 sur les dunes du Rimel (Bizerte) et dès 1930 à Dar chichou (Cap Bon) et Tabarka.

- **Au Maroc**, les plantations de pin pignon ont été réalisées principalement au nord du pays, le long de la côte. Les reboisements récents sont surtout localisés dans la région de Tanger, Larache et Tétouan (Sbay, 1995).
- **En Turquie** méridionale et sud-orientale (Anatolie, régions de Kozak et de Smyrne), depuis le niveau de la mer jusqu'à 700 m d'altitude environ, à 60-70km de distance de la mer, sur une étendue de 30000 à 35000 ha ; Le Pin pignon forme des peuplements mélangés avec *Pinus brutia*, *Cupressus sempervirens*, *Quercus ilex* et *Q. calliprinos* (Firat, 1943; Akman et al. 1978).
- **En Grèce**, *Pinus pinea* se rencontre dans les régions suivantes: le Péloponèse occidental, l'Attique, la région de Marathon, la Crète, les Iles Egéennes, les Iles Ioniques, la presqu'île Chalcidique (Sibthorp et Smith, 1813; Papaioannou, 1935; Moulopoulos, 1964; Papamichos et Alii, 1986).
- **En France**, le Pin pignon constitue des petits peuplements plus ou moins réguliers. Ils sont rarement spontanés. En général, il s'agit de peuplements d'origine subsponnée ou artificielle (Perrin, 1954). Les peuplements sont presque purs ou mixtes avec le pin maritime (Palayson, le Muy, Col du Rouet, Vallescure) (Debazac, 1977). On le trouve jusqu'à une altitude de 400-600m (Cemagref et O.N. F, 1987).
- **En Espagne**, il occupe la plus grande superficie avec un peu plus de 442.000 ha, dont à peu près 200.000 ha d'origine naturelle. Le Pin pignon, qui se trouve ici dans son aire optimale, ne dépasse pas 1000 m d'altitude. En Andalousie, il pousse au niveau de la mer ; dans les régions centrales il s'approche de sa limite écologique en se mélangeant au pin maritime, tandis qu'en basse altitude, il se mélange au pin d'Alep (Gonzales Vasquez, 1947 cités par Agrimi et Ciancio, 1993).
- **Au Portugal**, la surface totale du pin pignon est de 70000 ha, dont 60% à peu près poussent dans le département de Setubal (Vacas De Carvalho, 1989) ou les peuplements de pin pignon occupent une surface de 32090 ha (Alpuim, 1989).
- **En Italie**, le Pin pignon occupe au total une superficie estimée à 40 000 ha environ. Mais en réalité, les formations pures où le Pin pignon fait partie de l'étage dominant, sont estimées à 30 000 ha environ, concentrés surtout en Toscane (10 000 ha), Latium, Campanie, Calabre, Sicile et Sardaigne (Castellani, 1989; Barsanti et Rombai, 1983; Gatteschi et Milanese, 1988; 1989).



Figure 1. Aire de répartition géographique du pin pignon dans le monde (Fady et al. 2004)

3.3. Répartition en Algérie

En Algérie les plantations de pin pignon ont été réalisées entre 1935 et 1974 couvrant une superficie totale de 3506 ha. Les wilayas concernées sont : Constantine, Bouira, Mostaganem, Médéa et Annaba (Figure 2).

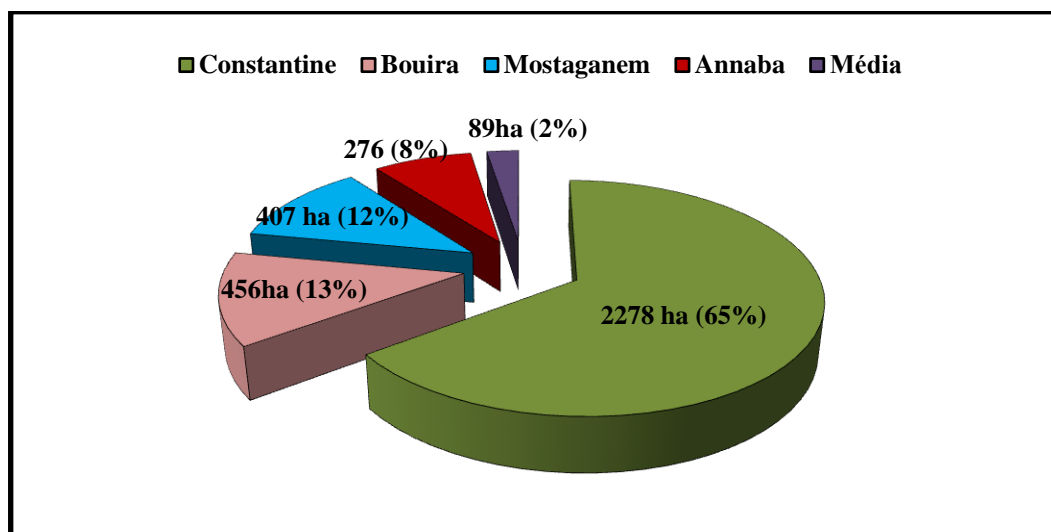


Figure 2. La superficie du Pin pignon dans les 5 wilayas (IFN, 2008)

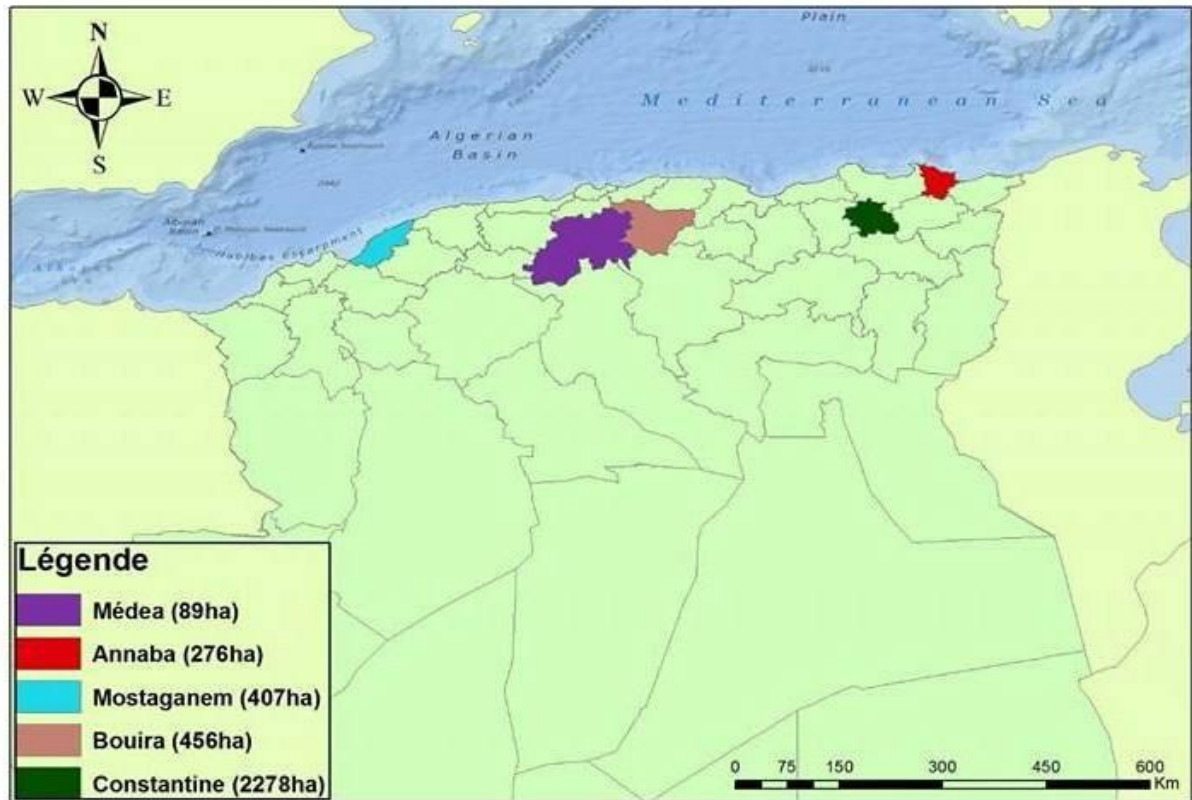
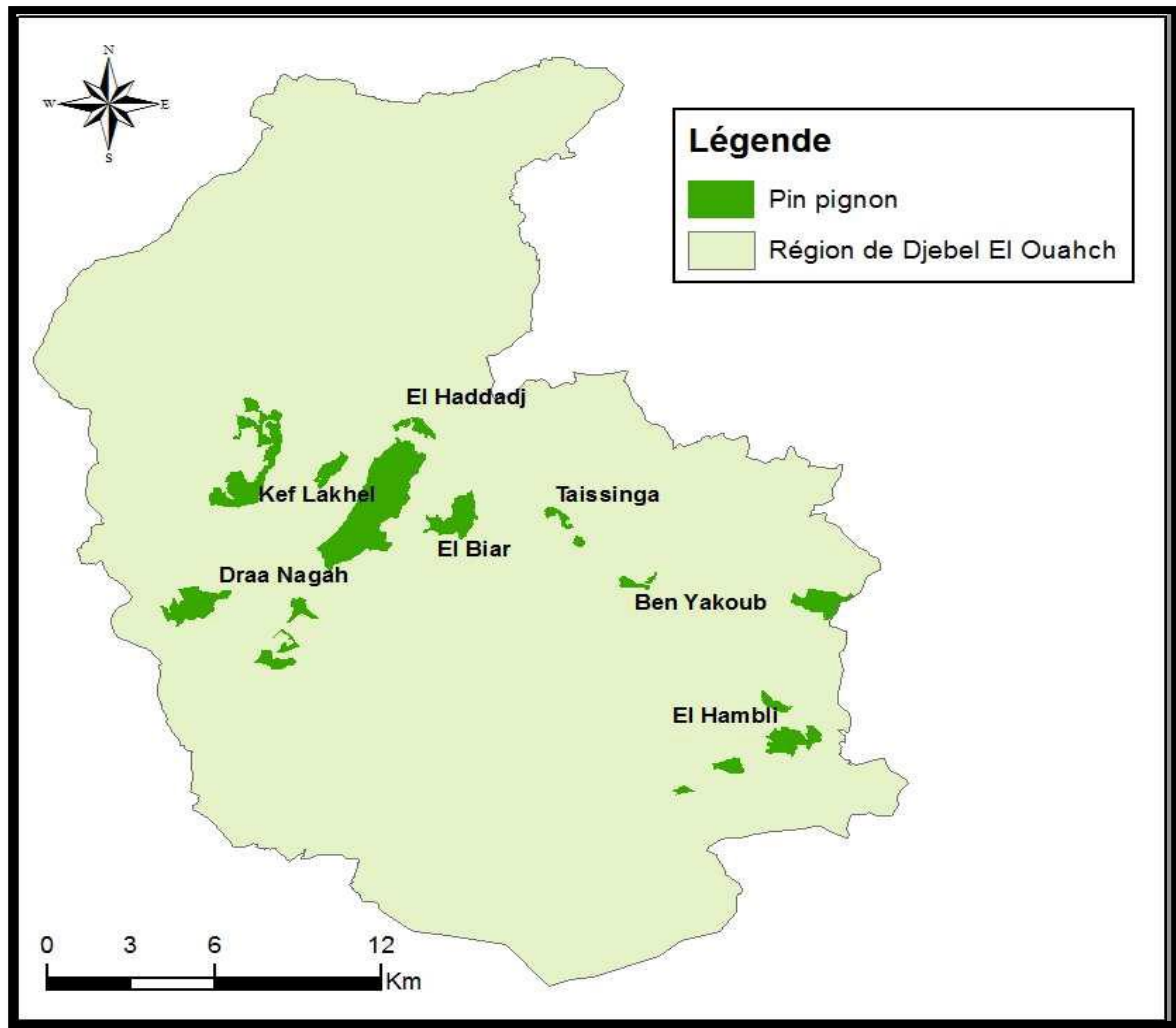


Figure 3. Répartition géographique des plantations du pin pignon en Algérie

D'après les résultats de l'inventaire forestier national (IFN) réalisé en 2008 les trois quarts des plantations de pin pignon concerne la wilaya de Constantine. Elles sont localisées au niveau de la région de Djebel El Ouahch (Carte 1).



Carte 1. Localisation des plantations de pin pignon dans la région Djebel El Ouahch.

4. Phénologie

La phénologie (dont l'origine étymologique est phénoménologie) désigne, au sens large, l'ensemble des particularités morphologiques du cycle de développement d'un végétal, avec mention des époques de l'année correspondantes. Au sens strict, c'est l'étude des relations entre les phénomènes climatiques et les caractères morphologiques externes du développement des végétaux (Delpech et al. 1985). Par développement, on entend toute modification qualitative dans la forme de la plante (Durand, 1967).

La phénologie est la science ayant pour objet l'étude des phénomènes saisonniers qui marquent la vie des plantes et des animaux tout au long de l'année (Vennetier et al. 2011).

Si la phénologie des plantes est clairement liée au climat (Differt, 2001; Lebourgeois et al. 2008), cette relation dépend de l'espèce, de sa variabilité génétique et de sa sensibilité à différents facteurs météorologiques: ainsi certaines espèces dépendent plus de la pluie, d'autres de la température, certaines sont plus sensibles aux limites imposées par le froid en hiver ou par la chaleur au printemps. Pour une espèce donnée cette dépendance thermique peut varier en fonction de sa situation par rapport aux limites de son aire de répartition (Morin et al. 2007).

Les modifications dans la forme des plantes sont jalonnées par des repères phénologiques ou stades de développement. Afin de pouvoir identifier les variations dans le temps, il est nécessaire de définir exactement les phénomènes auxquels on s'intéresse. Ces phénomènes s'appellent "stades phénologiques" (Ulrich, 1997). On emploie également les termes "phases phénologiques", ou "phénophases". Il existe un nombre important de stades phénologiques chez les arbres et les arbustes. En voici quelques exemples, extraits notamment de "l'Atlas Phénologique" utilisé en suisse et édité par l'Institut Suisse de Météorologie (Primault et al. 1971) et de l'ouvrage "La forêt et ses ennemis" (Abgrall et Soutrenon, 1991):

- Bourgeons entièrement fermés (stade hivernal)
- Bourgeons allongés, écailles non décollées
- Bourgeons tendres, début de décollement des écailles
- Bourgeons ouverts, les écailles s'ouvrent
- Bourgeons épanouis, souvent une feuille se déplie déjà
- Pousse courbée, plusieurs feuilles ou aiguilles libres dépliées
- Feuilles ou aiguilles en fin de développement, ayant pris une couleur vert foncé
- Pleine floraison
- Polycyclisme
- Fruits mûrs
- Début de la décoloration automnale des feuilles
- Décoloration automnale complète des feuilles
- Chute des feuilles...

La phénologie des végétaux est influencée par divers facteurs biotiques (insectes. oiseaux....) et abiotiques dont le climat (température. pluviométrie, lumière, humidité..), le sol, la topographie et le génotype. De tous ces facteurs, ceux qui retiennent le plus l'attention sont les facteurs climatiques, en particulier les données hydrique, et thermiques. Elles sont en général les plus limitant es pour la plante et déterminent son comportement phénologique.

Poupon (1980) montre que les variations pluviométriques inter-annuelles expliquent dans une large mesure les fluctuations de la phénologie des espèces ligneuses installées à Fété-Olé (Sénégal). La quantité annuelle des pluies mais aussi leur répartition a un effet sur le développement des populations. Le départ de la feuillaison étant d'autant plus précoce que l'année est mieux arrosée, la floraison totalement absente ou retardée et de courte durée en année sèche.

Grouzis et Sicot, (1980) constate le rôle prépondérant de l'eau du sol sur le déterminisme des phases de feuillaison et de floraison de *Combretum aculeatum*.

L'influence de la température et/ou du photopériodisme a fait l'objet de divers travaux (Njoku, 1963 ; Jackson, 1966; Sauer, 1975 ; Borchert, 1983 ; Mori et al. 1990 Specht et Yates, 1990).

Jackson, (1966) établit une parfaite corrélation entre la floraison et la somme des températures de l'air et Njoku, (1963) montre l'importance de l'influence du photopériodisme sur la phénologie à 10" d'altitude en Afrique.

4.1. Débourrement et période de végétation

On appelle débourrement l'épanouissement des bourgeons. Les auteurs considèrent généralement qu'un bourgeon est débourré lorsqu'il est ouvert, et qu'il laisse entrevoir les jeunes feuilles ou aiguilles. Cependant, les définitions utilisées pour caractériser le débourrement varient.

Ce phénomène étant essentiellement déterminé par la température, on considère souvent qu'une certaine somme de températures est nécessaire pour qu'il se réalise. Cette somme est généralement calculée en additionnant, à partir d'une date initiale, les températures journalières supérieures à un seuil d'action déterminé. *Là foliation*, ou *feuillaison*, est le processus permettant l'apparition et le développement du feuillage, depuis le bourgeon dormant jusqu'à la feuille adulte (Comps et al. 1987).

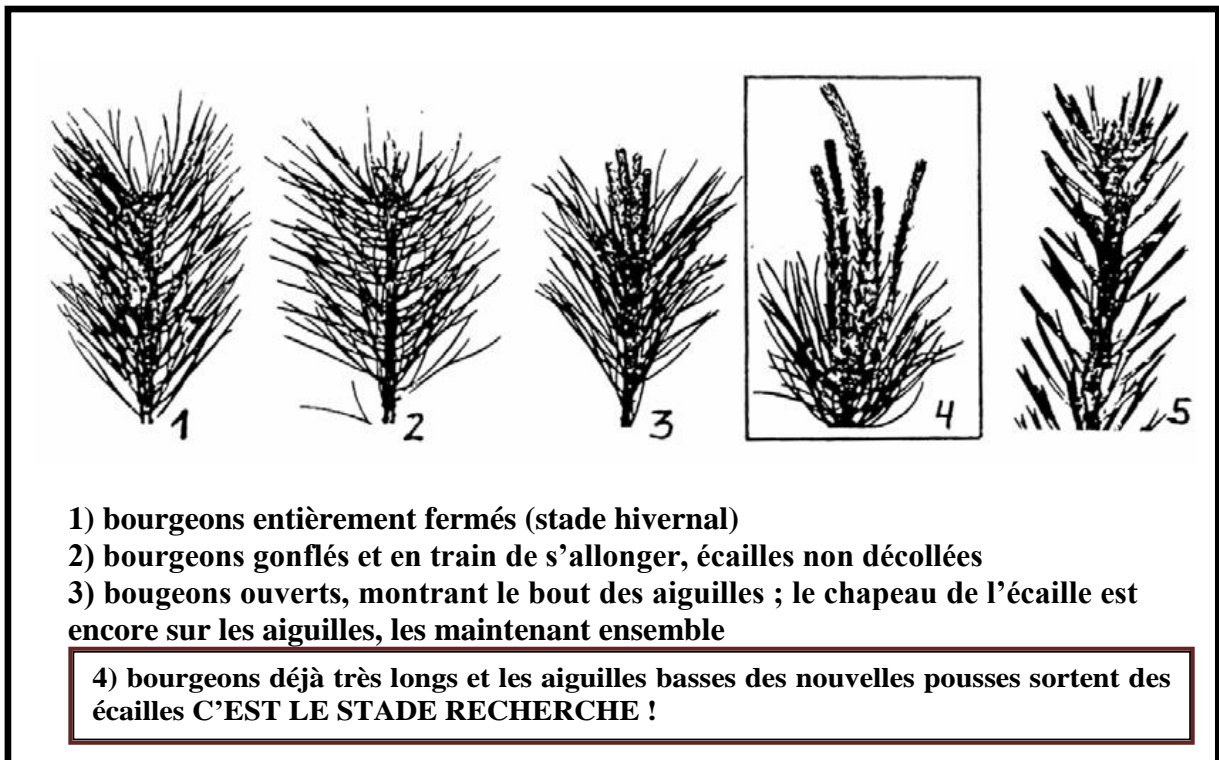


Figure 4. Description détaillée des stades phénologiques de débourrement des résineux (hors mélèze) utilisés dans le réseau RENECOFOR (d'après Ulrich 1997)
(Source du schéma : IUFRO (années 1960, transmis par David Durant)



Photo 5. Stade recherché pour les pins (bourgeons très longs et les aiguilles basses)

La période (ou saison) de végétation a été définie de multiples façons. Pour certains auteurs, il s'agit de la période pendant laquelle s'effectue la croissance en hauteur de l'arbre (Fontanel, 1979). Comps et al. (1987) la définissent comme étant la période photosynthétiquement active. Ainsi définie, ses limites sont fixées de manière variable selon les auteurs, en utilisant des critères phénologiques :

- Tomescu (1957), cité dans Malaisse (1964) la définit comme la période comprise entre le début de la foliation et la coloration des feuilles ;
- Cointat (1959) définit la période de végétation du hêtre, ou période chlorophyllienne, comme étant celle comprise entre la date de "floraison" complète et le moment où les feuilles sont jaunes
- Galoux et al. (1967) choisissent comme début et fin de la période de végétation d'une chênaie-charmaiehêtraie les dates de mi-feuillaison et de mi-coloration automnale de la strate arborescente (espèces dominantes) ;
- Malaisse (1964) et Comps et al. (1987) définissent la période d'assimilation de la hêtraie comme étant celle comprise entre le stade "feuilles plissées et velues apparentes" (stade moyen 4 de foliation) et le stade moyen où les feuilles sont jaunes. Cependant des mesures réalisées sur le Noyer ont montré que le bilan de CO₂ ne devenait positif que lorsque les feuilles étaient dépliées, donc après le stade 4.

La période de végétation peut aussi être considérée comme l'expression d'une valeur climatique. Certains auteurs considèrent qu'il s'agit du nombre de jours de l'année dont la température moyenne de l'air est égale ou supérieure à un certain seuil de végétation. On obtient alors une «durée de végétation». Le seuil thermique retenu varie selon les auteurs et les espèces étudiées, et est généralement compris entre 2°C et 10°C. Galoux (1966) a, pour le hêtre, choisi un seuil de 10°C : cette température est le seuil thermique retenu par de nombreux auteurs comme critère climatique de la période de végétation de la forêt caducifoliée européenne (Rubner, 1960 cité dans Galoux et al. 1967). Fontanel (1979) prend en compte des seuils de 5,8°C pour le douglas, de 4,2°C pour l'épicéa commun et de 4,5°C pour les pins (au-dessous de ces seuils l'élongation de la pousse terminale ne se produit pas). Primault (1990) donne une définition du début théorique de la période de végétation, à savoir 7 jours consécutifs où la température moyenne de l'air est supérieure ou égale à 5°C.

4.2. La phénologie comme indicateur du changement climatique

La phénologie est l'un des processus les plus sensibles aux variations thermiques ; et de toutes les réponses de la biosphère au réchauffement climatique, la réponse de la phénologie est la plus facilement perceptible (Sparks et Menzel, 2002 ; Walther, 2004). Les observations récentes des événements phénologiques des arbres montrent en effet que le débourrement, la floraison, la maturation et la sénescence ont subi d'importants changements lors des dernières décennies. Ainsi, le réchauffement climatique des dernières décennies est responsable de l'allongement de la saison de croissance des arbres dans la plupart des zones géographiques. Cet allongement de la saison de croissance est la conséquence d'une avance significative des dates de débourrement (Ahas, 1999 ; Menzel et Fabian, 1999 ; Beaubien et Freeland, 2000 ; Schwartz et Reiter, 2000 ; Ahas et al. 2002 ; Chmielewski et Rotzer, 2002 ; Root et al. 2003 ; Menzel et al., 2006) et d'un retard de la sénescence (Chmielewski et Rotzer, 2001; Defila, 2001; Menzel et Fabian, 1999; Menzel et al. 2006) particulièrement dans les hautes latitudes de l'hémisphère Nord (Sparks et Menzel, 2002 ; Root et al. 2003 ; Menzel et al. 2006).

Parallèlement à ces études qui utilisent des observations directes *in situ*, des études indirectes utilisant les variations de CO₂ (Keeling et al. 1996) ou des données satellitaires (par exemple le NDVI, « Normalized Difference Vegetation Index ») indiquent également un allongement de la saison de végétation au cours des dernières décennies et corroborent les données observées sur le terrain (Myneni et al. 1997; Tucker et al. 2001; Zhou et al. 2001).

4.3. Croissance et production de biomasse

Le Pin pignon développe généralement un verticille par an. Il est très rare qu'il en développe plus à l'instar d'autres pins tels que *Pinus radiata* et *Pinus pinaster*.

Le caractère monocyclique de la croissance de *P. pinea* se traduit par la formation d'un seul cerne ligneux et d'un seul verticille de branches par an : la croissance en diamètre est prédominante en avril, l'allongement des pousses l'est en mai et celui des aiguilles en juin-juillet. L'activité du cambium se maintient pendant 8 mois (Cabanettes et Rapp, 1978).

L'allongement de la pousse survient principalement au printemps ; la croissance polycyclique est rare chez les arbres adultes et si elle est présente, la deuxième unité de croissance est toujours plus courte que la première (Mutke et al, 2003). La 2ème vague de croissance est sous le contrôle des conditions climatiques.

En Tunisie, on a relevé une durée de croissance allant de 90 à 170 jours (Poupon, 1970). La longueur des pousses, y compris celle de la flèche, est assez constante dans les 3/4 supérieurs du houppier; par contre, les branches se redressent rapidement au cours de leur croissance car le bourgeon terminal de la flèche n'exerce qu'une faible dominance sur le reste du houppier.

En Italie, des études de Castellani (1978-79) menées dans quelques pinèdes côtières de la Ligurie et du Latium, indiquent que la croissance en diamètre se poursuit pendant toute l'année. Toutefois, l'accroissement mensuel moyen montre deux périodes de ralentissement: décembre-février et fin-juillet-août, époques qui correspondent aux basses températures hivernales et aux grandes sécheresses estivales.

Liphschitz et al. (1982, 1986) ont vérifié l'existence, chez le Pin pignon, d'une période d'inactivité hivernale parfaitement définie.

L'étude de la biomasse épigée et hypogée effectuée par Cabanettes et Rapp (1978), dans un peuplement de 33 ans sur le littoral méditerranéen français, a permis de relever les éléments suivants:

- 1) la biomasse totale de cette pinède, où la densité est de 800 tiges par hectare, la circonférence moyenne 63,4 cm, la surface terrière 39,9 m²/ha, et la hauteur de l'arbre moyen 10,4 m, est de 146 t/ha; ces 146 t/ha se répartissent en 124 t/ha de biomasse aérienne et 22 t/ha de biomasse racinaire, c'est-à-dire 136,8 t/ha de matériel pérenne et 9,2 t/ha de matériel photosynthétisant, soit 16% du total.
- 2) le bois fort (diamètre supérieur à 7 cm) représente 68% de la biomasse totale, correspondant à une masse de 98,9 t/ha soit à un volume de 204 m³/ha;
- 3) les branches sèches persistent longtemps sur le fût constituant une nécromasse relativement importante, estimée à 11,3 t/ha, soit 70% de la masse des branches vives.

L'étude de la répartition et des flux de matière organique dans un peuplement d'environ 30 ans, comportant 800 tiges par ha, de 10,5 m de hauteur moyenne et ayant une surface terrière de 32,0 m²/ha, a permis d'estimer le stock de matière organique du site à 337 t/ha, dont 179 t/ha représentent la phytomasse aérienne et racinaire, 158 t/ha le matériel organique mort, décomposé en nécromasse, litière et matière organique du sol.

La production, en termes de biomasse, des différents composants végétatifs et reproductifs d'un peuplement de Pin pignon a été estimée dans la région littorale méditerranéenne française à 18,6 t/ha par an. Le poids du houppier et de ses composants à une grande importance dans le bilan de croissance de l'arbre: 40% de la production nette est

constituée par les aiguilles, tandis que 20% seulement sont à attribuer au tronc; le reste, exception faite des 6% des racines, est constituée par les branches et les organes reproducteurs (Cabanettes et Rapp, 1978).

4.4. Fructification et reproduction

La fructification (Production de fruits) commence dès l'âge de 15 à 20 ans, mais la production de graines n'est abondante que tous les 3 ou 4 ans seulement (parfois 5 ou 6).

Une corrélation positive a été mise en évidence entre les pluies du bimestre février-mars de la première année, et la production de cônes pendant l'automne de la troisième année. Par contre, la pollinisation du gamétophyte féminin et la production consécutive de cônes ne sont pas particulièrement influencées par la pluviosité pendant la période de floraison (Pozzera, 1959). Vabre-durrieu (1956), classe le Pin pignon parmi les espèces à graines qui n'ont pas de dormance. Le pouvoir germinatif varie de 70 à 90%, il dure en moyenne de 4 à 6 mois et peut se prolonger plus d'un an, si l'on conserve les graines au froid sec.

La reproduction débute vers l'âge de 8 à 20 ans selon les peuplements (Veechi, 1980). La fécondation a lieu en avril de la seconde année. La maturité du fruit, sa déhiscence et la chute des graines ont lieu en septembre de la troisième année.

La majorité des pins présente un cycle de reproduction qui couvre trois années (Sarvas 1962, Owens et Molder 1984, Owens et Blake 1986, Fletcher 1992, Philipson 1997). Toutefois, le Pin pignon a un cycle de quatre ans, contrairement aux pins noir, maritime et sylvestre. La pollinisation a eu lieu au printemps $n+1$ mais le développement du tube pollinique et de l'ovule sont interrompus pendant deux ans, si bien que la fécondation et la maturation de l'embryon ne se produisent qu'au cours de l'année $n+3$ (Owens et Blake, 1986) (Figure 5).

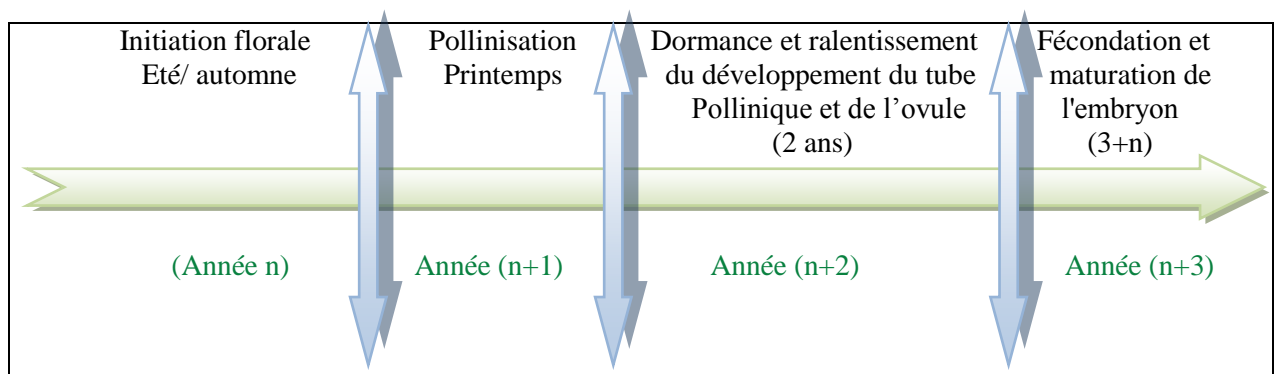


Figure 5. Représentation chronologique de cycle de reproduction de Pin pignon (Owens et al. 2006)

4.5. Organes de reproduction et production des graines

Les arbres, monoïques, forment des inflorescences unisexuées. L'époque de floraison est comprise entre mai et juin.

Les chatons mâles sont placés à la base des rameaux de l'année. Ce sont des inflorescences cylindriques, jaune verdâtre teinté de brun, formées d'écailles imbriquées, avec de nombreuses étamines, chacune avec deux sacs polliniques; les microsporophylles commencent à se différencier en automne (Photo 6, a). Les nombreuses inflorescences mâles naissent d'apex du type que ceux donnant naissance aux brachyclades. La période de pollinisation est comprise entre avril et juin avec un maximum au mois de mai, c'est-à-dire beaucoup plus tard que le maximum de pollinisation du pin d'Alep et du pin maritime. Après la chute du pollen, les chatons sèchent et tombent.

Les macrosporophylles sont terminaux ou sub-terminaux et apparaissent sous les bourgeons. Leur forme est globulaire, ovoïde. Ils sont vert clair, striés de rouge vineux. Ils prennent la forme d'un cône ligneux dans lequel les écailles qui portent les ovules et les bractées couvrantes sont toujours indépendantes.

Les inflorescences femelles, issues des macroclades, apparaissent, par une, deux ou plus; ces macroclades génèrent d'abord des feuilles écailleuses, à l'aisselle desquelles se forment les apex des brachyclades. Chaque apex méristhématique donne naissance à une inflorescence femelle. Les macrosporophylles apparaissent au milieu de l'automne ou au début de l'hiver. Les écailles des inflorescences femelles s'ouvrent en mai.

En avril de la première année, les cônes sont encore petits (environ de 20 mm de long), et pédonculés; les ombilics de leurs écailles sont hérissés, non mucronés. La deuxième année, ils atteignent la dimension d'une noix et la troisième année, leur taille définitive (Photo 6, b).

Les cônes sont solitaires (rarement réunis par 2 ou 3), sub-sessiles, résineux. D'abord d'un vert foncé à nuance violette puis de couleur ocre brun brillant, arrondis, ovoïdo-coniques, de 8 à 14 cm de long, de 7 à 10 cm de large, ils ont des écailles en écusson renflé, à ombilic peu saillant.

Les graines, grosses, à coque ligneuse sont groupées par deux à la base de chacune des écailles. De forme ovée-oblongue, elles ont 15 à 20 mm de long et 7 à 11 mm de large et sont couvertes d'une poudre brunâtre que l'on peut facilement enlever. Ces graines sont munies d'une aile courte et caduque. Elles sont comestibles et contiennent une amande riche en amidon et en huiles essentielles.

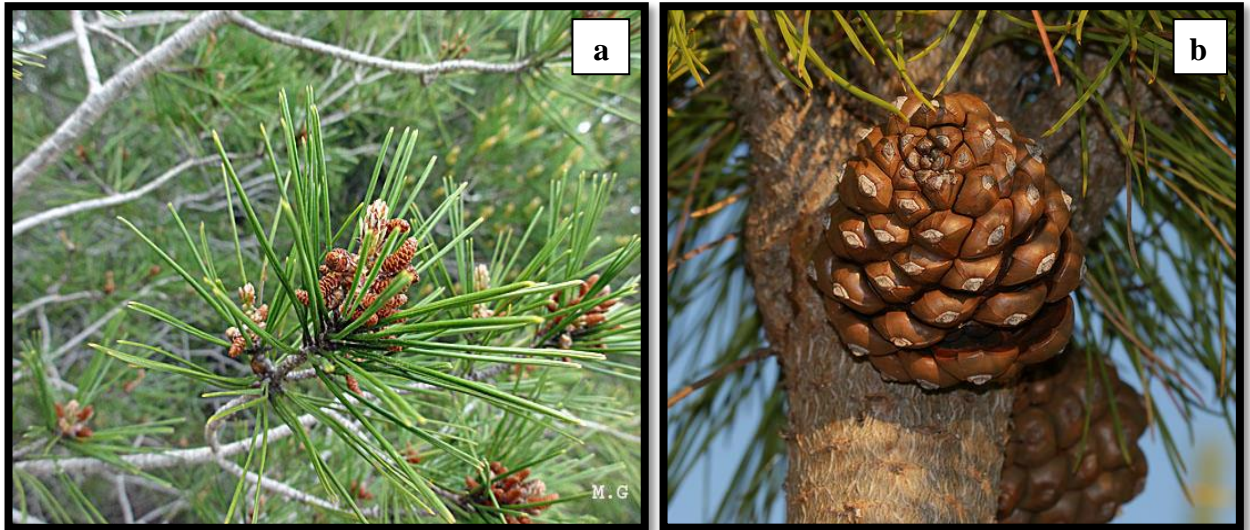


Photo 6. Pin pignon, a: Cônes males; b: Cônes femelles

L'absence d'une espèce dans une communauté peut être due à plusieurs facteurs. Le premier est le manque de graines (Pärtel et al. 2000; Turnbull et al. 2000; Foster et Tilman, 2003; Eskelinen et Virtanen, 2005; Gross et al. 2005; Ehrlen et al. 2006) qui peut être dû à une limitation de la production ou de la dispersion des graines. L'approvisionnement en graines est variable d'une espèce à une autre. Certaines espèces de pins méditerranéens sont caractérisées par une bonne production semencière annuelle (*P.halepensis*), d'autres montrent une ou deux bonnes années semencières tous les quatre à six ans (Gordo et al. 2000). Certains pins de montagne montrent une périodicité semencière de trois ans ; pour d'autres, elle suit des intervalles irréguliers (Pardos et al. 2005).

Un climat sec et chaud au moment de la différenciation des bourgeons reproducteurs est un facteur déterminant de la taille finale des semences chez les conifères et les feuillus (Greene et Johnson, 2004) mais d'autres facteurs sont impliqués, notamment l'humidité durant la pollinisation. De plus, les températures fraîches peuvent limiter la production des graines mûres chez les forêts de conifères et cela devient plus aigüe avec l'augmentation de la latitude et de l'altitude (Henttonen et al. 1986 ; Sirois, 2000).

Leadem et al. (1997) ont montré que la production des graines est aussi sous l'influence des caractéristiques des arbres et des peuplements tel que la densité, l'arrangement spatial, la hauteur, le diamètre à hauteur de poitrine, la surface basale des arbres et l'état sanitaire des houppiers.

Les pertes des graines sont dues en grande partie à des avortements de fleurs, cônelets ou cônes. Chez les pins américains, 40% à 100% des fleurs femelles n'achèvent pas leur transformation en cônes mûrs (Boyer, 1974; Ebel, 1974; Bramlett, 1977; Edwards, 1986; Owens et al. 2001), l'essentiel des pertes se produisant au cours de la première année (Ebel, 1974; Bramlett, 1977). Chez le pin sylvestre, une forte proportion des cônelets est susceptible d'avorter et de tomber au sol les années de mauvaise floraison (Sarvas, 1962). Des observations faites dans les vergers français de pin maritime, mettent en évidence de forts avortements de cônelets. Les pertes sont comprises entre 20% et 70% selon les années et les sites. Généralement les cônelets se nécrosent et tombent rapidement, un à deux mois après la floraison mais, certaines années, les chutes peuvent se poursuivre jusqu'au printemps suivant. Ces avortements, causés par une pollinisation insuffisante, des insectes, des acariens, le gel ou un déficit nutritionnel, constituent un sérieux facteur limitant en vergers de pins.

Une mauvaise pollinisation constitue une cause majeure de réduction du potentiel en graines. Elle résulte d'une faible production de pollen, d'une mauvaise synchronisation entre la réceptivité des fleurs femelles et le vol du nuage de pollen ou encore des conditions défavorables au transport et à la capture du pollen. Les conditions climatiques peuvent aussi influencer sur la réussite de la pollinisation en perturbant (1) la libération et l'acheminement du pollen vers les fleurs femelles (2) en contrariant la capture du pollen et son transport sur le nucelle (Kosinski, 1986).

Les ovules de pins sont incapables de se développer sans pollen mais sans qu'on sache exactement si c'est la présence ou la germination du pollen qui importe. Dans les ovules non pollinies ou ayant reçu du pollen incapable de germer, le jeune gamétophyte dégénère dans les semaines qui suivent la pollinisation (Sarvas, 1962; Owens et Molder, 1984). L'ovule est de très petite dimension lorsqu'il avorte, on obtient donc une très petite graine aplatie et flétrie (Owens et al 1984) ou simplement une aile si le tégument ne se forme pas (Sarvas, 1962; Bramlett, 1977). Dans les cônes de pins parvenus à maturité, toutes les ovules potentiellement fertiles ne se transforment pas en graines pleines. Dans des peuplements Finlandais de pin sylvestre, une étude menée sur les proportions des graines pleines, vides et flétries (Sarvas, 1962), montre que le quart des ovules fertiles n'est pas pollinisé et avorte rapidement.

Outre les causes mentionnées précédemment, les insectes sont les plus dommageables. En effet les dégâts sont causés par des espèces attaquant après la fécondation ou par le développement de larves issues d'oeufs pondus avant ce stade. Ils se manifestent par des destructions de graines –directes lorsque les larves se nourrissent aux dépens des graines ou

indirectes lorsqu'elles dévorent les tissus du cône- et parfois par le dessèchement puis la chute de cônes attaqués. Prenons l'exemple du pin sylvestre, les insectes et particulièrement les punaises ont un impact considérable sur l'avortement des ovules et la formation des graines vides ou partiellement détruites (Bramlett, 1974; Debarr, 1974). Aussi, des mammifères, notamment des écureuils, certains oiseaux et des champignons sont susceptibles d'occasionner des pertes de graines (Dinus et Yates, 1975; NAFC 1987; Kolotelo et al. 2001, Peters et al. 2003).

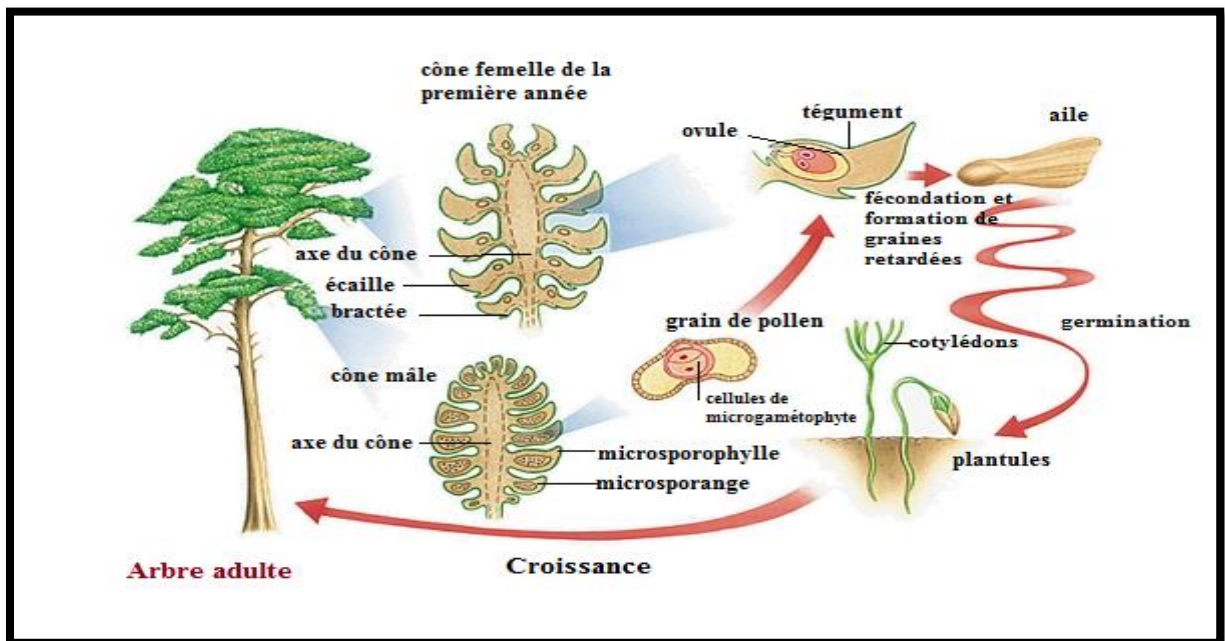


Figure 6. Cycle reproductif de pin pignon (<http://www.tela-botanica.org/bdtfx-nn-49685-synthese>)

4.6. Biologie de la germination

La stratification des graines facilite la germination. L'absorption d'eau par des graines stratifiées à 4°C provoque l'activation des enzymes qui accélèrent la germination. Cette accélération peut être amplifiée en traitant les graines, préalablement à leur stratification, avec une solution de pyridoxal phosphate (Pal-5-P) à 400mg/l d'eau. L'augmentation de cette vitamine du groupe B6 dans les graines traitées et après la germination confirme l'influence positive de ce facteur sur le métabolisme protéinique impliqué dans le processus germinatif (Arce de Obieta et Sanz Munoz, 1981).

Pendant la stratification, et surtout pendant la germination, toutes les fractions accusent des augmentations significatives (Arce de Obieta et Sanz Munoz, 1981). L'effet de la

conservation est semblable à celui de la présence prolongée des graines sur l'arbre (Armenise Porcelli et al. 1965).

Des essais de germination de graines de *Pinus pinea* L. dans l'obscurité ont mis en évidence le rôle de l'endosperme dans la morphogénèse normale de la plantule et la nécessité d'un rapport étroit de continuité entre ce dernier et l'embryon. L'endosperme a une importance notoire dans la nutrition des cotylédons (Liso, 1965). La consommation de grains d'aleurone semble être liée davantage à la croissance de la racicule et de l'axe hypocotylédonaire qu'à l'ouverture des cotylédons (Felicini, 1965; Giulini et Rascio, 1973). L'endosperme agit comme facteur de génération de la racicule, car les racines d'embryons traumatisés avec endosperme se régénèrent d'une façon normale, tandis qu'elles cessent de se développer dans les embryons nus (Armenise Porcelli et al. 1965).

Les premières plantules de Pin pignon apparaissent à la fin septembre, après les premières pluies automnales. Les températures optimales pour la levée varient de 16 à 19°C, et les températures supérieures à 25°C ou inférieures à 10°C arrêtent le processus de germination. La germination n'a pas lieu en été car, pendant cette saison, les températures moyennes dépassent 20°C, influant sur l'aridité du substrat ; des températures dépassent 25 à 28°C pendant dix jours amènent les graines à un stade de repos qui ne cesse qu'au retour de conditions thermiques favorables. En hiver, la germination est réduite par des températures comprises entre 10 et 15°C.

Une humidité du sol de 15 à 25% assure une bonne germination (Ferrari, 1950; Boncompagni, 1952; Magini, 1955), alors qu'un excès d'humidité la ralentit (Loisel, 1976).

Les conditions de la germination ont toutefois une influence sur la levée. Des études ont montré, par exemple, que des concentrations élevées de CaCO₃ (20 à 40%) et un pH bas (4-5) ont défavorablement affecté le pourcentage de germination et l'activité enzymatique respiratoire (Muscolo et al. 2007, cité par Khaldi, 2009).

4.7. Utilisation

a) Reboisement de protection : il joue un rôle extrêmement important dans la lutte contre l'érosion, dans les régions montagneuses et dans la fixation des dunes littorales, grâce à son système racinaire généralement très bien développé (Sbay, 2007).

Les pinèdes plantées le long des côtes ont pour but de constituer des brise-vents destinés à protéger contre les vents marins et les sables ce qui est derrière eux (surfaces cultivées, routes, bâtiments, etc.). Le Pin pignon peut être utilisé pour l'amélioration des formations dégradées du maquis, sur les bas de pente.

b) Production ligneuse : dans les stations fertiles, le Pin pignon peut produire jusqu'à 7,5m³/ha/an. Les reboisements de production ligneuse doivent se limiter aux zones bioclimatiques humides et subhumides sur terrains fertiles (Sbay, 2007). En ce qui concerne la production de bois fort, l'accroissement moyen est de 3 à 4 m³/ha/an dans des peuplements du nord de l'Italie et peut atteindre 7 à 8m³/ha/an dans des conditions écologiques très favorable (Djaziri, 1971). Du point de vue anatomique, il y a peu de différences entre le bois du pin pignon et celui des autres pins, il ressemble beaucoup au bois du pin maritime mais avec des canaux résinifères plus gros (Loullou, 1987).

c) Production fruitières : Mutke et al. (2005), a montré qu'actuellement, la valeur du Pin pignon vient essentiellement de sa production de pignes et non de son bois. La production en cône se situe en moyenne autour de 2 à 3t/ha/an (Mercurio, 1989).

d) Le Pin pignon dans l'évolution du paysage : Le Pin pignon est un véritable témoin de l'histoire de l'évolution économique, sociale et culturelle des populations du bassin méditerranéen. C'est un arbre qui marque le paysage de cette région, où il a toujours été introduit, ou réintroduit, dans des milieux profondément liés aux activités humaines (jardins et parcs, plantations d'alignement ou autres), milieux qui, toutefois, ont été "conquis" avec bonheur par le pin, qui devient ainsi un élément de valeur écologique et économique (Giacomini, 1968). Les pinèdes littorales constituent une entité bio-écologique importante sur le plan de l'esthétique du paysage, ainsi que pour l'ensemble des éléments de la nature. Elles constituent un exemple particulièrement intéressant: de tels peuplements induisent en effet des activités touristiques et récréatives intenses, favorisent la création d'infrastructures et le développement économique de leurs environs. Ainsi, la présence d'une pinède derrière la plage ensoleillée est appréciée par les touristes, qui aiment le changement qu'elle procure par rapport à la côte sableuse. (Cantiani, 1971; Paiero, 1971; Gatteschi e Milanese, 1988; 1989).

5. Ecophysiologie

5.1. Adaptation aux conditions extrêmes de température

La notion de stress implique, d'une part, une déviation plus ou moins brusque par rapport aux conditions normales de la plante ou de l'animal ; et d'autre part une réaction

sensible de l'individu dans les différents aspects de sa physiologie. Cette réaction change sensiblement, avec une adaptation à la nouvelle situation, soit à la limite, une dégradation menant à une issue fatale (Eclerc, 1999). En effet, le végétal possède des mécanismes qui peuvent empêcher ou retarder l'action de la contrainte, mais si la contrainte atteint le contenu cellulaire, il devra réagir et montrer une «tolérance » puis une « adaptation ». L'analyse de la spécificité des mécanismes de perception de stress, de la transduction du signal « stress » et de l'acquisition des modes de résistance, ont fait l'objet de plusieurs études, à différents niveaux, allant de la plante jusqu'aux processus moléculaires.

Les plantes sont généralement soumises à des stress qui se traduisent par des changements morphologiques, physiologiques, biochimiques et moléculaires qui affectent négativement la croissance de la plante et de sa productivité (Wang et al. 2001; Araus et al. 2002). Du fait de leur caractère immobile, les plantes ont développé un ensemble de mécanismes multifactoriels qui leur permettent de percevoir et de répondre spécifiquement aux différentes contraintes auxquelles elles sont soumises. Parmi ces contraintes, on trouve les stress biotiques (champignons, bactéries, virus...) (Léger, 2010) et abiotiques (blessures, pollution, salinité, sécheresse, températures extrêmes...) (Gómez et al. 2005).

Les stress abiotiques induisent des changements physiologiques (Langridge et al. 2006) et des changements dans les processus cellulaires et moléculaires (Knight et Knight, 2001; Chinnusamy et al. 2004; Chinnusamy et al. 2006; Verslues et al. 2006; Talame et al. 2007).

Les plantes mettent donc en œuvre des stratégies d'adaptation et de défense aux stress (Netting, 2002). Pour cela, elles possèdent des mécanismes de perception et de signalisation très complexes, leur permettant de produire une réponse plus ou moins spécifique du type de stress (Wang et al. 2003).

Dans le règne végétal, la température fait partie des contraintes environnementales les plus importantes. Elle est responsable de la distribution et de la productivité des plantes. Certaines espèces possèdent des propriétés physiologiques qui leur confèrent une meilleure tolérance aux variations thermiques, notamment aux situations les plus extrêmes, des basses et des hautes températures (Sung et al. 2003).

5.1.1. Effet des hautes températures sur les végétaux

Les hautes températures pendant un temps suffisant (exemple de durée) endommagent irréversiblement la fonction ou le développement des plantes. Elles peuvent être endommagées par des températures élevées de l'air ou celles du sol (Sung et al. 2003).

La plupart des plantes cultivées craignent les hautes températures, même pendant des laps de temps courts. Une température de l'air entre 45 et 55°C pendant une demi-heure abime directement les feuilles des plantes dans la plupart des cas, et même des températures plus basses (entre 35 et 40°C) peuvent être graves si elles persistent (Hopkins, 2003).

Les températures extrêmes peuvent causer la mort prématurée des plantes, réduisent la croissance et limitent la productivité. Les évaluations s'étendent jusqu'à une diminution de 17 % du rendement pour chaque augmentation en moyenne d'un degré Celsius de la température (Lobell et Asner, 2003).

5.1.2. Effet des basses températures sur les végétaux

La réponse des plantes aux basses températures dépend des caractéristiques du stress et de la plante. Un stress se caractérise par sa contrainte (intensité), sa durée, du nombre d'expositions ainsi que par son association à d'autres stress (biotique et abiotique).

Certaines plantes peuvent subir des lésions provoquées par un stress, ce qui signifie qu'elles peuvent montrer des dysfonctionnements métaboliques. Si le stress est léger et de courte durée, la lésion peut être temporaire et la plante peut guérir lorsqu'il est éliminé. S'il est par contre suffisamment important, il peut inhiber la floraison et la production des graines ou encore empêcher la survie de la plante (Hopkins, 2003). Ainsi, la capacité d'une plante à supporter le stress est variable suivant son stade de développement, le moment le plus critique étant pendant les phases de reproduction (Figure 7).

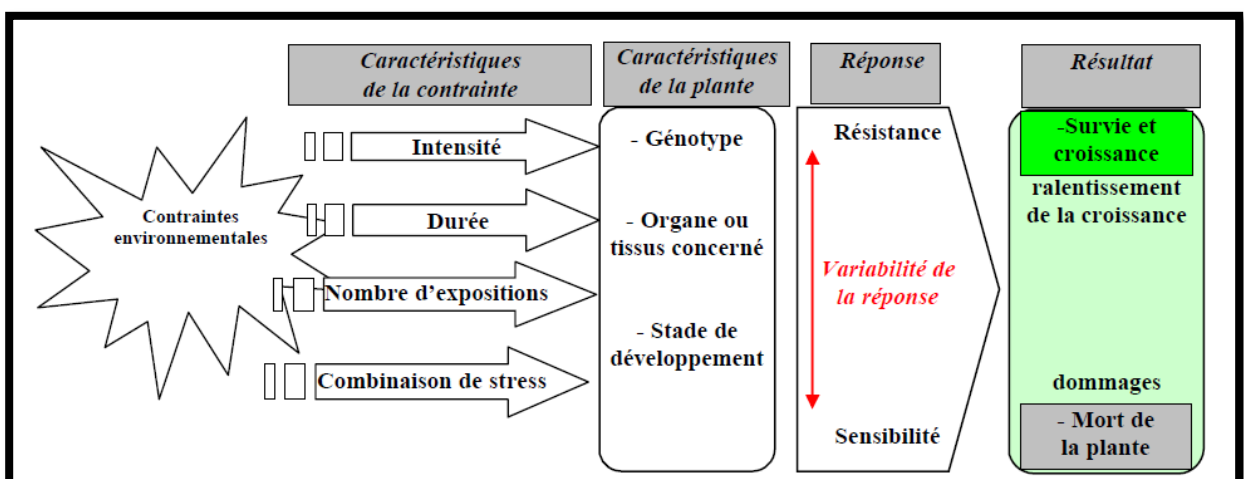


Figure 7. Facteurs conditionnant la réponse de la plante à un stress abiotique (d'après : Bray et al. 2000 in Touchard, 2006)

Les membranes biologiques sont surtout constituées de lipides. Ces derniers forment une bicouche composée d'acides gras insolubles, à l'intérieur des membranes, dont chacun est accroché à une tête polaire faisant face à un environnement aqueux (Bohnert et al. 1999 in Badawi, 2008). Une baisse de température diminue la fluidité des lipides et par conséquent celle des membranes biologiques.

La tolérance au froid proviendrait de la capacité des génotypes à maintenir une forte concentration en pigments, et à former un appareil photosynthétique fonctionnel à basses températures. Un génotype tolérant conserverait une activité photosynthétique, une quantité de chlorophylles a et b et un rapport a/b suffisant pour continuer sa croissance sans pour autant subir des dommages photooxydatifs. Au niveau de la composition en xanthophylle, les génotypes sensibles accumulent la zéaxanthine tandis que les génotypes tolérants privilégient la violaxanthine. Cela suggère que les besoins en dissipation d'énergie seraient plus importants chez les génotypes sensibles que chez les tolérants (Haldimann, 1999).

La modification de la composition et des teneurs en pigments seraient donc un caractère d'adaptation au milieu (Foyer et al. 2002). Face à des températures sub-optimales (environ 15°C), les plantes réduisent leur teneur en chlorophylle a et b et accumulent de la zéaxanthine et de l'anthéroxanthine (produites à partir de la violaxanthine) (Haldimann, 1999). Chez les mutants *virescents* (retard dans l'acquisition de la couleur verte), les teneurs en xanthophylles et le quenching non photochimique sont corrélés positivement. Les mutants pour lesquels le pool de xanthophylle est maintenu à un niveau équivalent à celui du génotype sauvage présentent les mêmes flux tout en ayant moins de chlorophylle. Les xanthophylles permettraient la dissipation thermique de l'excès d'énergie et donc limiterait la formation de ROS (reactive oxygen species) (Pasini et al. 2005).

5.2. Réponses des plantes au stress hydrique

Le déficit hydrique est une contrainte permanente de la production agricole dans de nombreux pays au climat de type méditerranéen. Elle est à l'origine des pertes de production agricole dans de nombreuses régions. Les risques du manque d'eau sont et deviendront de plus en plus fréquents et persistants, à l'avenir, par suite des changements climatiques causés par l'effet de serre (Witcombe et al. 2009). Passioura (2004) définit le déficit hydrique comme étant les circonstances dans lesquelles les plantes accusent une réduction de croissance et de production suite à une alimentation hydrique insuffisante.

Tardieu (2005) mentionne que le statut hydrique de la plante passe progressivement par trois principales phases, selon le développement du stress hydrique. Au cours de la phase initiale, la transpiration et l'assimilation se déroulent comme si la plante dispose de l'eau à volonté. Cette phase se poursuit jusqu'au moment où le niveau d'absorption racinaire ne peut plus satisfaire la demande climatique que subit le feuillage. La réserve utile du sol est alors épuisée à 50 %. Après ce seuil, la plante entre dans la seconde phase, au cours de laquelle la transpiration et l'assimilation sont réduites relativement au potentiel.

La plante réagit de façon dynamique au cours de cette phase, pour rétablir l'équilibre entre la demande climatique et l'offre du sol, faisant intervenir des mécanismes qui lui sont propres dont le développement du système racinaire, la régulation stomatique et/ou l'ajustement osmotique. Quand le déficit hydrique devient plus intense, alors la plante entre dans la troisième et dernière phase au cours de laquelle les stomates se ferment complètement, annulant toutes activités photosynthétiques. Toutes les pertes hydriques de la plante se font alors à travers les voies non stomatiques (cuticule). Il n'y a plus de gain de matière sèche, la respiration consomme les hydrates de carbone stockés et la plante passe au stade de survie. La période de survie dépend du rythme de la transpiration résiduelle et de la tolérance à la dessiccation des tissus vivants restants. Selon Kameli et Losel (1996) la croissance s'arrête avant qu'aucun abaissement notable ne soit perceptible dans le contenu relatif en eau. Le premier effet du déficit hydrique est de réduire la vitesse de croissance des cellules de la tige.

6. Sylviculture et amélioration de pin pignon

6.1. La structure des peuplements

Les types structuraux les plus fréquents et les plus caractéristiques des pinèdes de pin pignon sont les trois suivants:

- 1) peuplements équiennes : peuplements destinés à la production de pignes; plantations réalisées pour améliorer les facteurs édaphiques; plantations de protection et de production;
- 2) peuplements inéquiennes (jardinés): peuplements pluri-stratifiés et avec des classes d'âges différentes sur des petites ou très petites surfaces;
- 3) peuplements mixtes: mélanges de plusieurs espèces, dont la structure est influencée par le tempérament de chacune d'elles.

C'est uniquement par l'analyse de la structure du peuplement, et surtout en accord avec l'écosystème, que l'on peut choisir des objectifs valables (production de pignes, production de

bois, production mixte: pigne, bois, fourrage; protection du sol; tourisme), et partant, définir les règles de gestion (Ciancio, 1991).

Les peuplements les plus récents, dont la production intensive (pignes, bois,.. etc.) est l'objectif principal, sont uniquement équiennes. Cette structure peut être maintenue ou modifiée par les interventions sylvicoles.

La structure régulière se retrouve dans des pinèdes anciennes du fait des incendies répétés, du pâturage non contrôlé, de la récolte des pignes ou parce que le peuplement est en limite d'aire écologique. Ces différents facteurs sont de nature à causer des déséquilibres irréversibles qui empêchent la régénération naturelle. Dans les peuplements irréguliers, au contraire, la structure est complexe: elle présente un profil pluri-stratifié dans lequel des groupes d'arbres d'âge et de dimensions différentes sont répartis dans l'espace d'une manière aléatoire (Ciancio et al. 1986).

D'autre part, il arrive qu'à la suite d'un traitement prolongé déterminé, certaines pinèdes, même d'origine artificielle, perdent leur caractère équienne. Dans ces cas, la distinction schématique entre peuplement régulier et irrégulier est insuffisante et souvent incorrecte pour définir une pareille structure: les peuplements sont devenus stratifiés et irréguliers du fait de la façon dont ils ont été utilisés ou traités: coupes illégales, coupes phytosanitaires, etc. La régénération naturelle de certaines pinèdes est exclusivement due à de telles circonstances (Pavari, 1955; Ciancio et al. 1986).

Pavari (1955) écrivait que les pinèdes de Pin pignon existant dans le Bassin méditerranéen sont, en majorité, jardinées plutôt que régulières. Et dans tous les Pays méditerranéens où le Pin pignon a une importance considérable, c'est-à-dire en Italie, en Espagne et en Anatolie, on remarque de nombreux cas de pinèdes se régénérant naturellement; cela est d'ailleurs la règle dans ces deux derniers pays.

❖ **Les peuplements mixtes**

En Espagne, *Pinus pinea* L. qui tend à former des peuplements purs, est parfois mélangé à des peuplements de chêne vert et de chêne liège, ou à d'autres pins, le Pin d'Alep et à moindre échelle le Pin maritime (Montero et Gomez, 1989).

En Tunisie le Pin pignon a été introduit dans les peuplements de chêne liège dégradés et dans du maquis, dans le but d'augmenter la valeur de ce dernier par la production de pignes (Aloui, 1988).

En Turquie, le Pin pignon forme des peuplements mixtes avec *Pinus brutia*, le Cyprès et les chênes du *Lauretum* (Dogan, 1991). *P.pinea* a été planté avec succès en mélange avec *Acacia cyanophylla* sur des dunes sableuses des côtes méridionales afin de les fixer.

L'écartement entre les lignes d'Acacia doit être inférieur à 6 mètres de façon à permettre aux pins de tirer le plus grand bénéfice possible de la fixation d'azote par les Acacia (Zech et Çepel, 1973).

En Grèce, dans la forêt de Strofilia, l'écosystème comprend, entre autres, les espèces d'arbres suivantes: *Pinus halepensis*, *Pinus pinea*, *Quercus macrolepis*, dominant un sous-bois où on trouve *Myrtus communis*, *Pistacia lentiscus*, *Quercus coccifera*, *Cistus salvifolius*, *Aristella bromoides*, *Dactylis glomerata*, *Brachypodium sylvaticum*, *Dasypyrum villosum*, etc.... En analysant les unités phytosociologiques dont le Pin pignon fait partie, Papamichos et alii 1986, ont identifié cinq unités phytosociologiques forestières:

- forêts de *P.pinea* sur dunes basses;
- forêts mixtes de *P.pinea* et de feuillus sempervirents dominés;
- forêts de *P.pinea* avec *Aristella bromoides*;
- forêts de *P.pinea* avec *P. halepensis*;

Les peuplements mixtes d'origine artificielle forment aussi des entités très différenciées: les exigences sylvicoles et de gestion sont propres à chaque situation.

Le sous-bois est dominé par *Ampelodesmos mauritanicus*, la bruyère à balais, la bruyère arborescente, la bruyère multiflore et le calycotome. La stabilisation de ces peuplements est obtenue par une élimination progressive des conifères et le contrôle de la végétation herbacée et arbustive, afin de permettre aux feuillus de se développer aussi vigoureusement que possible dans l'étage dominé, avec le minimum de concurrence. Avec ce traitement, ces peuplements pourront, à terme, remplacer intégralement les conifères plantés (Cavalli et Corsi, 1987).

En 1976, Cantiani a observé que "...le Pin pignon se développe vigoureusement, se régénère naturellement et tend à se propager rapidement dans les taillis d'Eucalyptus".

❖ **Les pinèdes à structure complexe**

La structure de ces peuplements est variée: depuis plusieurs siècles, en effet, ces pinèdes ont été exploitées plus ou moins intensément, sans critères sylviculturaux bien définis. Les incendies, le pâturage, la mise en culture, les élagages, dans le seul but de récolter du bois de chauffage, ont profondément modifié les peuplements, en les rendant presque équiennes.

Un autre facteur de perturbation de la même importance est constitué par la récolte des cônes qui peut soustraire tout ou partie des graines au processus biologique. Cette structure - qui ne peut pas être rigoureusement qualifiée de régulière ou jardinée, puisque si le peuplement est équienne sur de petites surfaces, il montre, néanmoins, dans son ensemble, des caractères inéquiennes - est le résultat d'opérations conduites selon les nécessités du moment, donc hors aménagement, telles qu'exploitations diverses, coupes illicites, interventions phytosanitaires, etc...Ces coupes ont provoqué des taches de régénération naturelle des pinèdes (Ciancio et al. 1986).

6.2. Les pinèdes destinées à la production de graines pour la consommation

L'aménagement est caractérisé par: la conduite du peuplement vers sa densité optimale ; la périodicité et l'intensité des coupes correspondantes ; l'élagage.

❖ Densité

La densité du peuplement doit être choisie de façon à ce que les arbres puissent étendre leurs branches au maximum, sans interpénétration ou superposition des houppiers. Cette interpénétration ou superposition des houppiers a en effet pour conséquence une baisse de production résultant de l'arrêt de la croissance des branches et de la diminution de la surface de cime exposée à la lumière. De plus, en provoquant le frottement de rameaux enchevêtrés, le vent peut faire tomber des cônes verts (Cantiani et Scotti, 1988) (Photo7).



Photo 7. Forêt dense de pin pignon (Station El Hambli- Djebel Ouahch) (2015)

❖ **Eclaircies et élagages**

La nature et la périodicité des coupes éclaircies et des élagages sont des éléments caractéristiques de l'aménagement des pinèdes équiennes de Pin pignon.

Les éclaircies commencent à l'âge de 8 à 10 ans et sont répétées tous les 4 ou 5 ans, avec une intensité variable selon la densité initiale du peuplement. Dans les pinèdes italiennes, il s'agit généralement d'éclaircies par le bas, avec élimination des arbres dominants ou co-dominants, peu productifs. Le critère de sélection, lié essentiellement à la production de pignes, doit tenir compte, selon Cappelli (1958).

L'éclaircie n'a pas d'effet immédiat sur la production. Dans un premier temps, les arbres bénéficient de plus de place, et la croissance en diamètre augmente la résistance mécanique du fût. C'est seulement ensuite que l'on relève des effets significatifs sur la fructification (De Philippis, 1949; Cappelli, 1958), bien que, l'année suivant l'éclaircie, l'augmentation de la production moyenne par arbre ne soit due qu'à l'élimination des arbres les moins producteurs.

Au Portugal, les résidus des éclaircies sont abandonnés, dûment broyés, sur le terrain, afin de limiter les risques d'incendie et d'enrichir le sol en matière organique. En l'absence de broyage, et laisser souvent les déchets sur le sol. En Italie, au contraire, les règlements en vigueur prévoient l'enlèvement des déchets de l'exploitation.

Le Pin pignon perd d'autant plus ses branches basses par élagage naturel que la densité du peuplement est élevée. Mais les élagages artificiels peuvent accélérer le phénomène et favoriser par la production des pignes. Le premier élagage est fait lorsque les arbres ont atteint un diamètre d'au moins 8 à 10 cm, c'est-à-dire vers 10 ans environ, selon la rapidité de leur croissance. Ils ont alors 7 à 8 m de haut. Cet élagage, dénommé élagage de dégagement, ne doit pas dépasser le tiers de la hauteur totale. Les interventions ultérieures n'enlèveront que le tiers inférieur du houppier vert.

Dans des conditions de milieu et de densité favorables, le Pin pignon peut atteindre une hauteur de 25 à 30 m, avec un fût sans branches de 12 à 15 m (Pavari, 1955; Ciancio et al. 1986).

Le Pin pignon cicatrise bien les plaies d'élagage. Néanmoins il est préférable d'intervenir pendant la période de repos de la végétation, afin d'éviter le risque de dégâts dus à des parasites. La comparaison du rendement de différents outils utilisés pour l'élagage (tronçonneuse, cisaille hydraulique, croissant) a montré que la tronçonneuse est la plus

efficace (Photo 8). La température ambiante et la grosseur des branches à couper influent, à l'évidence, sur le rendement des interventions (Baldini et Nardiberti, 1986).



Photo 8. Elagage de pin pignon à la tronçonneuse

❖ **Aménagement des pinèdes pour la production de pignes**

En Italie, les pinèdes privées du littoral toscan destinées à la production de pignes sont aménagées depuis longtemps en futaies équiennes. Selon Biondi et Righini (1910), cet aménagement comprend:

- a) un dépressage à l'âge de 3 ou 4 ans, laissant 4000 tiges/ha;
- b) une première éclaircie et un élagage la 12ème année, laissant 800 tiges/ha;
- c) une deuxième éclaircie avec élagage la 19ème année, laissant 400 tiges/ha;
- d) une troisième éclaircie et élagage la 27ème année, laissant 100tiges/ha, densité définitive.

Du fait de sa rentabilité, la production de pignes, représente le principal intérêt des pinèdes de Pin pignon. La production dépend de différents facteurs, qui favorisent ou réduisent la production: la station, l'origine des peuplements, l'âge des arbres, le milieu, la densité, le traitement, les élagages, les modalités de régénération, l'état sanitaire, la présence d'éléments de perturbation de l'équilibre écologique de la pinède (par exemple la baisse de la nappe phréatique consécutive au creusement de puits artésiens pour l'approvisionnement en eau des cultures agricoles; augmentation de la salinité de la nappe salée, etc.).

En Tunisie, dans les peuplements âgés de 20 à 50 ans, la production de pignes varie de 50 à 250 kg/ha, et la production totale est estimée à 200 t. Presque la moitié de cette production est utilisée par les populations locales; 10% seulement, en moyenne, sont consacrés à la propagation de l'espèce (Aloui, 1988).

6.3. La plantation d'arbres pour la production de pignes

Le greffage des arbres destinés à la production de pignes permet de hâter le début de la production (d'où une meilleure rentabilisation des investissements) et de résoudre, en partie, le problème de la rareté de la main-d'oeuvre pour la récolte des cônes (arbres moins hauts). La méthode, en Espagne, prévoit de planter les porte-greffes à écartement définitif ainsi que des soins culturaux intensifs (défrichement du terrain, fumure, etc). On procède au greffage lorsque les porte-greffes ont 2 à 4 ans; les greffons sont prélevés sur des individus sélectionnés pour leurs performances de production de pignes. Les greffes homoplastiques et heteroplastiques de Pin pignon (Une greffe homoplastique est une greffe dans laquelle greffon et porte greffe appartiennent à la même espèce, voire au même individu; dans une greffe heteroplastique il s'agit de deux espèces différentes.) sont fiables (Magini, 1966; Baccari et al. 1968). Elles se comportent comme des individus femelles, c'est-à-dire qu'elles ne forment pas de microsporophylles, du moins les 15 premières années. Le pollen, nécessaire pour la fécondation et la formation du fruit provient de pins des environs. On effectue la première récolte lorsque les greffes ont au moins 4 ans (Catalan bachiller, 1989).

❖ Greffes de Pin pignon sur pin pignon

Des plantations expérimentales de ce type ont été réalisées depuis 20 ans en Castille et Léon. Les résultats sont satisfaisants. Les greffes ont été effectuées à Valladolid et à Badajoz. A Badajoz il existe aujourd'hui presque 30 ha de plantations de Pin pignon greffé sur Pin pignon; ces plantations ont été implantées dans d'excellentes conditions de milieu, sur des sols ardoisiers; les densités varient de 200 à 250 tiges/ha, (Catalan bachiller, 1989).

❖ Greffes de Pin pignon sur pin d'Alep

En Murcie et à Castellon, sur des sols argileux, marneux ou gypseux, le greffage a été réalisée sur porte-greffe de Pin d'Alep, mieux adapté à ces sols que d'autres pins. Dans la province de Castellon, plus de 10000 greffes de Pin pignon sur Pin d'Alep ont déjà été

réalisées ; les pins les plus âgés ont maintenant une vingtaine d'années. Les plantations ont été réalisées en employant comme porte-greffe des semis de Pin d'Alep âgés de deux ans et élevés en conteneur. Les résultats obtenus montrent qu'au cours des 15 premières années, aucun phénomène de rejet. En l'absence d'exemplaires adultes de pin pignon, on procède à la pollinisation artificielle des fleurs femelles. 90% de ces fleurs produisent des cônes adultes ayant le même nombre de pignons pleins et le même pourcentage de graines vides ou avortées que les cônes récoltés dans les pinèdes naturelles. Les cônes, ainsi que les pignes obtenus, ont des dimensions comprises dans les fourchettes de variation relevées pour les dimensions des cônes et des pignes de l'espèce (Catalan bachiller, 1989).

6.4. Les caractéristiques et emplois du bois de pin pignon

Le Pin pignon a un bois de cœur jaune rougeâtre et un aubier blanc rosé avec des cernes distincts et généralement d'une certaine épaisseur; ce bois, tendre, à fil assez droit, a une texture moyenne à grossière; la présence de bois de compression est fréquente dans les fûts courbés par le vent. Les nœuds sont gros. La fibre est plutôt droite. Le bois est abondamment résineux et contient des poches de résine. Les altérations de couleur que l'on peut noter sont souvent dues à des champignons des genres *Lenzites* et *Fusicoccus* dont les spores passent à travers les blessures anciennes de l'écorce. La résistance aux attaques de champignons et d'insectes est faible (Giordano, 1990).

Le poids spécifique moyen du bois vert est de 900 kg/m³ et, après séchage normal, se réduit à 620 kg/m³. Le retrait est faible à moyen. La résistance à la compression axiale est en moyenne de 42 N/mm², la résistance à la flexion est de 83 N/mm²; ses caractéristiques en flexion dynamique sont modestes. Le module d'élasticité est de 13300 N/mm² (Giordano, 1990).

L'usinage du bois de pin pignon est facile, mais la quantité de résine que ce bois contient oblige à des interruptions fréquentes pendant l'usinage. Le séchage et les assemblages par clous ou vis sont aisés; toutefois ces derniers sont de faible résistance.

Le bois de Pin pignon est principalement employé pour les pilotis, le bois de mine, la charpente, le sciage pour menuiserie grossière et emballages, la laine de bois, la trituration pour les panneaux, la pâte à papier ou la cellulose. Grâce à sa bonne résistance à l'humidité, le bois de Pin pignon est employé, surtout en Espagne et en Italie, dans la construction de bateaux (Giordano, 1990).

6.5. La récolte des cônes

La récolte des cônes est faite en hiver ou au printemps par des ouvriers spécialisés, qui grimpent dans les arbres à l'aide de crampons ou d'échelles. Ils provoquent la chute des cônes mûrs de l'arbre où ils se trouvent et éventuellement de ceux des voisins à l'aide de perches crochues. Le séchage des cônes se fait en plein air, en cas, ou dans des entrepôts où ils restent jusqu'à l'été: ils sont alors exposés au soleil, ce qui provoque leur ouverture. L'extraction des pignes peut être faite à la main ou mécaniquement, au moyen de dessiccateurs-trieurs (Gradi, 1961).

Les pignons criblés sont commercialisés pour la graine, ou pour un traitement industriel ultérieur. Cônes et coques sont utilisés pour le chauffage.

La récolte manuelle des cônes est un travail périlleux et très pénible. Les ouvriers doivent monter et descendre continuellement le long des troncs, parfois dans des conditions climatiques difficiles. De plus, aujourd'hui il est de plus en plus difficile de trouver du personnel qualifié parce que les jeunes préfèrent des travaux moins dangereux. Les difficultés pour trouver de la main-d'œuvre ont ainsi régulièrement augmenté, ce qui a poussé à la recherche de systèmes mécanisés pour la récolte des cônes.

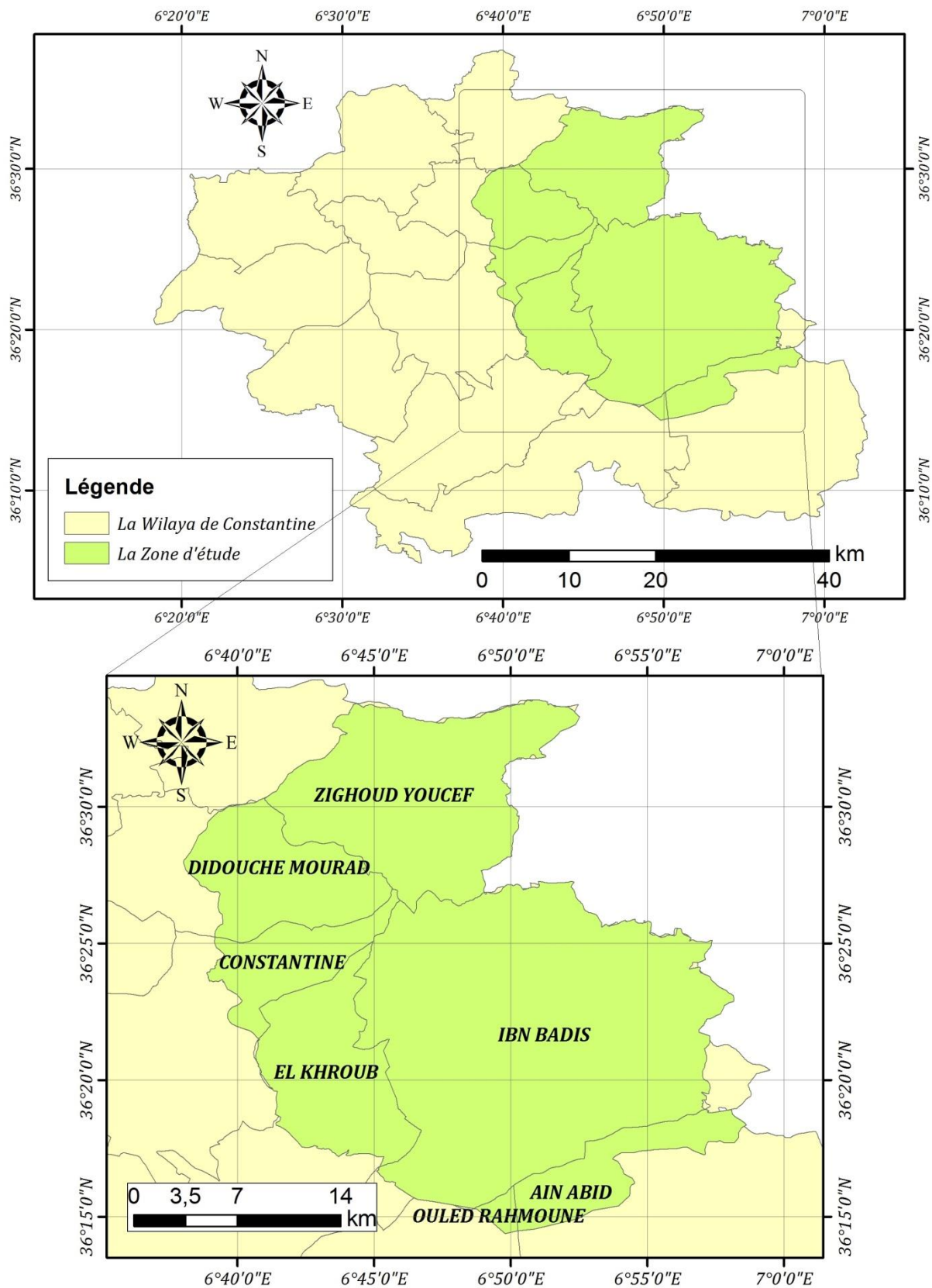
La mécanisation de la récolte s'est développée en Italie, bien que la récolte manuelle soit encore préférée là où il est encore possible de trouver de la main-d'œuvre. Toutefois, étant donné le coût de l'équipement et le fait que son utilisation est limitée à trois mois seulement de l'année (novembre à février), sa diffusion est encore limitée (Catalan bachiller, 1989).

I. Zone de Djebel Ouahch

1. Situation géographique

Constantine l'une des grandes Wilayas de l'Est Algérien, limitée au Nord par la Wilaya de Skikda, au Sud par la Wilaya de Oum El-Bouaghi, à l'Est et à l'Ouest respectivement par la Wilaya de Mila et Guelma. La forêt de Djebel Ouahch située au coté Est de la ville de Constantine, regroupe, plusieurs essences forestière (Chêne vert, Chêne liège, Erable champêtre, Peuplier blanc et Pin pignon).

La région de Djebel Ouahch constitue une unité géographique importante comprise entre $36^{\circ}14'20,19''$ et $36^{\circ}33'55,81''$ de latitude Nord et entre $6^{\circ}38'0,82''$ et $6^{\circ}58'37,65''$ Est des longitudes (Carte). Elle s'étend sur une superficie de 66.535 ha et concerne sept communes, à savoir : Zighoud Youcef, Didouche Mourad, Constantine, El Khroub, Ibn Badis, Aïn Abid et Ouled Rahmoune.



Carte 2. Localisation géographique de la zone d'étude

1.1. La topographie

La région de Djebel Ouahch est caractérisée par une topographie très accidentée, marquée par une juxtaposition de hautes plaines, de collines, de dépressions et de ruptures brutales de pentes donnant ainsi un site hétérogène.

Dans la partie nord, le territoire de Zighoud Youcef présente, aux extrémités de la commune, une région essentiellement montagneuse où dominant des reliefs avoisinant les 800 m d'altitude (Djebel Cheraga 868m). A l'intérieur des cuvettes, séparées par des collines avec de longs versants incisés, occupées essentiellement par la céréaliculture, les pentes sont comprises entre 3 et 25%.

Les communes de Constantine, El Khroub, Didouche Mourad et la partie nord d'Ibn Badis appartient au domaine des hautes plaines constantinoises, où le relief est très varié mais essentiellement montagneux, composé principalement de chaînes calcaires et marno-calcaires dont les principaux sont : Djebel Ras Kalaa (1160m), Djebel Ouahch (1280m) et M'zaret Sidi Chagref (1289m) qui présente une morphologie à pentes abruptes. Parallèlement à ces montagnes, une série d'envergure moins importante, sillonne la région, il s'agit de : Djebel Djenane El Lobba (1000m), Djebel Rgueb El Djemel (960m) et Djebel Ouled Selem (921m).

Au Sud, la commune d'Ibn Badis est située dans une région montagneuse qui fait partie de l'Atlas tellien. Les altitudes varient entre 870 et 1320m. La plus importante chaîne de montagne est celle de Djebel Oum Settas qui s'étale vers le Sud-Est avec un sommet culminant à 1338 m.

1.2. La géologie

La constitution géologique des reliefs est complexe et s'exprime par un contact de formations structurales différentes (Pdau, 2010) :

- Les nappes néritiques constantinoises qui se composent essentiellement de calcaires massifs et rigides (Djebel Oum Settas).
- Les nappes des flysch manifestées par des formations argilo-gréseuses du numidien.
- Les nappes telliennes représentées par les argiles priabonniennes.
- Les affleurements de nappes telliennes se situent vers le Nord d'Ibn Badis. Le chef-lieu de la commune est localisé à l'extrême Sud de montagnes formées de nappes de flysch, et à la proximité d'un contact entre les nappes de flysch et les nappes rigides péri-telliennes.

Entre le massif de Djebel Ouahch et celui d'Oum Settas, nous avons une dépression drainée par Oued El Haria. Sur les terrains de la dépression, on peut distinguer les niveaux suivants :

- Le fond plat de la dépression qui est tapissé de limons organiques inondés temporairement.
- Les terrains presque plats situés un peu haut par rapport à la dépression, ils sont constitués d'argiles et au-dessous d'une couche de dépôts limoneux d'une fertilité importante.
- Les terrains relativement inclinés de la dépression, correspondent aux niveaux des glacis anciens de Constantine. Ils sont constitués de blocs bien roulés pouvant atteindre 80cm de diamètre noyés dans une matrice limoneuse.

Enfin, au niveau de Zighoud Youcef, on distingue les séries sédimentaires suivantes (Pdau, 2006) :

- Des alluvions récentes, constituées de limons et de galets, occupant les fonds des vallées actuelles.
- Les alluvions anciennes des vallées actuelles (niveau inférieur) qui ont un modèle de terrasses de limons et cailloux roulés, dominant de 10 à 40 cm le lit actuel des oueds.
- Le miocène argileux gréseux de l'oued Zighoud Youcef, la série montre une alternance d'argiles noires, des calcaires marneux gris bleu et de grès fins jaunâtres, l'ensemble renfermant du gypse en abondance.
- Le miocène montrant des assises rougeâtres de plus de 100 m d'épaisseur, où alternent des grès et des sables avec des intercalations d'argiles et de conglomérats.

1.3. La géomorphologie

Djebel Ouahch est un massif ancien à dominante gréseuse (grés de Numidie) où les bancs de grés alternent avec des passées argileuses plus au moins marneuse. Ceci se traduit grâce au pendage subhorizontal par une série de replat topographique et qui donnent au massif, l'aspect d'une structure en « gradins », en effet sous l'action de l'érosion les roches moins résistantes s'érodent vite mettant ainsi en relief les affleurements de couches. Cette stratification a favorisé par ailleurs la formation des plateaux structuraux qui dominent l'ensemble des reliefs.

Le réseau hydrographique a profité dans la majeure partie des cas de ces roches tendres pour se frayer un chemin, ce qui a déterminé l'organisation générale du réseau hydrographique, lequel est subséquent à la structure (Boulfefel, 1979).

L'autre facteur qui a contribué au façonnement de la topographie, est le couvert végétal, en effet les zones dénudées sont celles qui sont les plus affectées par l'action érosive. Ceci est visible dans le paysage, les terres agricoles sont localisées essentiellement dans les dépressions qui s'intercalent entre les grands glacis d'érosion qui constituent les versants du massif. Les glacis d'érosion sont jonchés de conglomérats gréseux, et continuellement interrompus par une série de ruptures de pentes plus au moins importantes.

Enfin, en contre bas une grande dépression d'El Haria entrecoupé par des monticules gréseux ; exemples : Djebel Ouahch –Changoura – Dermoun, lesquels sont des reliefs témoins en plein milieu de la dépression d'El Haria. Ces monticules ont finalement découpés la grande dépression en trois sous dépression :

- ❖ sous dépression d'El Haria
- ❖ sous dépression d'El Hambli
- ❖ sous dépression de Tarfana

Cette dépression est traversée par l'oued El Haria, qui a formé de petites terrasses fluviales extrêmement fertiles.

1.4. La pédologie

Les principaux types de sols rencontrés dans la région de Djebel Ouahch, sont caractéristique des roches qui constitue le substrat de base (Boulfefel, 1979).

❖ Les sols minéraux bruts

Ce sont des sols peu profond, très caillouteux en surface (blocs de grés) et dans le profil, de texture sableuse ou limono-sableuse ; et ce en raison du type de roche mère (gré numidien) ; ces sols se situent en général dans les zones montagneuses ; Djebel Djenane EL Lobba ; El Haria et Oum Settas.

❖ Les sols peu évolués

D'une manière général tout les sols peu évolué qu'ils soient vertique, hydro-morphe, modaux ou autres, se rencontrent exclusivement dans les dépressions, et plus particulièrement autour des oueds et chaabets de la zone. Sur le plan géologique, ils correspondent au quaternaire moyen, il s'agit de l'alluvion déposée en terrasses recoupées par les oueds actuels.

❖ Les vertisols

Ce type de sols se rencontrent à proximité des sources, et correspondent sur le plan géologique au quaternaire ancien et surtout moyen.

❖ **Les sols calcimagentiques**

Généralement ces types de sols se rencontrent sur les reliefs, où l'action de l'eau est peu marquée. Ils ont une texture grossière à moyenne et fine en profondeur. Géologiquement, ils correspondent au mio-pliocène et au numidien.

❖ **Les sols isohumiques**

Ces sols s'étendent de la dépression d'El Haria, jusqu'aux versants des massifs qui la ceinturent. Ils correspondent au quaternaire ancien, formation conglomératique d'une puissance supérieure à 50m.

2. Étude climatique

L'Algérie est sous l'influence d'un climat méditerranéen. Les étés sont chauds et secs, les hivers doux et humides (400 mm à 1 000 mm de pluie par an). Les températures moyennes varient en fonction de l'altitude. En été, le sirocco, un vent extrêmement chaud et sec, souffle du Sahara sur les Hauts Plateaux et dans l'Atlas saharien, les précipitations sont peu abondantes.

Une réduction des disponibilités en eau et une augmentation des besoins en eau d'irrigation sont prévus pour l'agriculture, causée par les modifications du régime des pluies la hausse de l'évapotranspiration et l'élévation du niveau de la mer ; conséquences des changements climatiques accentuant ainsi les risques sécheresses aux périodes cruciales des cycles de croissance de la végétation (Lehout, 2008).

Comme l'ensemble de l'aire méditerranéenne, la région de Constantine est caractérisée par des précipitations irrégulières et soumises à l'alternance bien marquée d'une saison sèche et d'une saison de pluies.

Les données climatiques, concernant la température, les précipitations, vent et humidité ont été obtenus à partir de la station météorologique de Ain El Bey pour la période de 1996-2015.

Tableau 1. Données climatique de la station de Ain El Bey (1996-2015) ONM

Paramètres	P (mm)	m (°C)	M (°C)	M+m/2	Hum (%)	Vent (m/s)
Mois						
Janvier	63.8	2.3	12.6	7.45	78.8	2.7
Février	62.1	2.1	12.6	7.36	76.9	3.2
Mars	56	4.7	16.6	10.68	73.0	2.9
Avril	51	7.1	20.7	13.86	70.5	2.5
Mai	41.1	10.4	25.6	17.99	65.7	2.4
Juin	15.9	14.9	31.4	23.13	53.7	2.6
Juillet	4.5	18.3	35.2	26.74	47.6	2.5
Aout	19.9	18.4	34.9	26.66	51.3	2.3
Septembre	39.2	15.7	29.5	22.60	64.5	2.2
Octobre	34.9	12.2	25.2	18.69	68.2	2.2
Novembre	55.9	6.9	17.7	12.27	75.7	2.5
Décembre	67.9	3.0	13.4	8.21	79.3	2.3

Source : ONM (1996-2015)

2.1. Correction des précipitations

Toutefois, nous avons élargie cette analyse dans la région de Constantine (Djebel Ouahch) sur une période allant du 1^{er} janvier 1996 jusqu'au 31 décembre 2015.

Selon Seltzer, On a :

- Une augmentation de **40mm** tous les **100m** (pour le continental)
- Une augmentation de **80mm** tous les **100m** (pour le littoral)

Le point le plus haut :

- Altitude maximale : 1160m
- Altitude de la station de référence (Ain El Bey) : 694m
- Différence d'altitude : 466m
- Pluviométrie de la station de référence: 512.1mm

$$K = \frac{\text{Précipitation annuelles de la zone d'étude}}{\text{Précipitation annuelles de la station référence}}$$

K= 1.36

Le point le plus bas :

- Altitude maximale : 750m
- Altitude de la station de référence (Ain El Bey) : 694m
- Différence d'altitude : 56m
- Pluviométrie de la station de référence: 512.1mm

K= 1.04

Tableau 2. Précipitation aux points extrêmes de la forêt de pin pignon (Djebel Ouahch)

P (mm)	P (mm) de la station référence	P (mm) du point le plus haut	P (mm) du point le plus bas
Mois			
Janvier	63.8	86.8	66.3
Février	62.1	84.5	64.6
Mars	56	76.1	58.2
Avril	51	69.4	53.1
Mai	41.1	56.0	42.8
Juin	15.9	21.7	16.6
Juillet	4.5	6.1	4.6
Aout	19.9	27.1	20.7
Septembre	39.2	53.3	40.8
Octobre	34.9	47.4	36.2
Novembre	55.9	76.0	58.1
Décembre	67.9	92.3	70.6
Total annuel	512.1	696.5	532.6

L'analyse du tableau 3, nous permet de constater que, la moyenne annuelle de la pluviométrie de la station d'Ain el bey est de 512,1 mm. La valeur maximale est de 67,9 mm enregistrée pendant le mois de décembre, par contre le mois le plus sec est le mois de juillet avec une pluviométrie de 4,5mm. On remarque aussi que la répartition temporelle des pluies est très variable (Fig 8). La distribution des précipitations dans la forêt de Djebel Ouahch est irrégulière comme le montre le tableau : le maximum de pluie est atteint au mois de Décembre et Janvier, tandis que les mois de Juillet et Aout ne reçoivent que de faible quantité.

Tableau 3. Variabilité des précipitations mensuelles de la forêt de pin pignon dans le temps

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
1996-2015	76.5	74.5	67.2	61.2	49.4	19.1	05.3	23.9	47.1	41.8	67.0	81.5

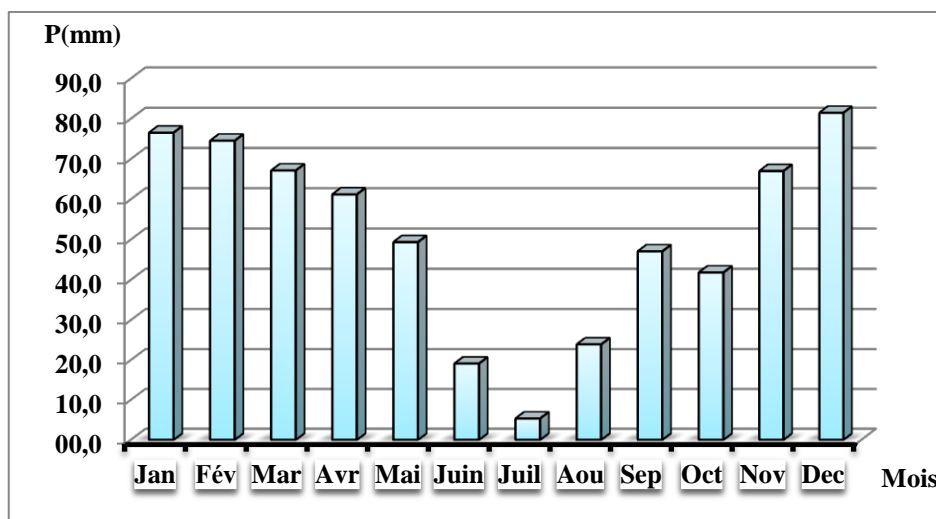


Figure 8. Moyennes mensuelles des précipitations de la forêt de Pin pignon (1996-2015)

❖ Répartition saisonnière des précipitations

Suivant le tableau (4), la forêt présente un régime saisonnier de type HPAE pendant la période (1996-2015). Il est très intéressant de mentionner que le régime était auparavant de type HAPE. On peut traduire ce changement de régime par l'irrégularité de la répartition mensuelle des précipitations, les mois de la saison printanière (Mars, Avril, Mai) reçoivent plus de pluie par rapport à la saison automnal (Septembre, Octobre, Novembre).

Tableau 4. Répartition saisonnière des précipitations de la forêt de pin pignon (1996-2015)

Mois	P (mm)	Saisons	Précipitation saisonnières (mm)	P(%)
Septembre	47.1	Automne	155.9	25.36
Octobre	41.8			
Novembre	67.0			
Décembre	81.5	Hiver	232.6	37.84
Janvier	76.5			
Février	74.5	Printemps	177.7	28.91
Mars	67.2			
Avril	61.2			
Mai	49.4	Eté	48.4	7.87
Juin	19.1			
Juillet	05.3			
Aout	23.9			
Total	614.6	-	614.6	100

Les pluies sont très nettement groupées pendant les mois d'hiver et d'automne, le maximum se situant généralement en décembre, plus rarement en juin. L'été est la saison sèche, le minimum se situe d'ordinaire en juillet.

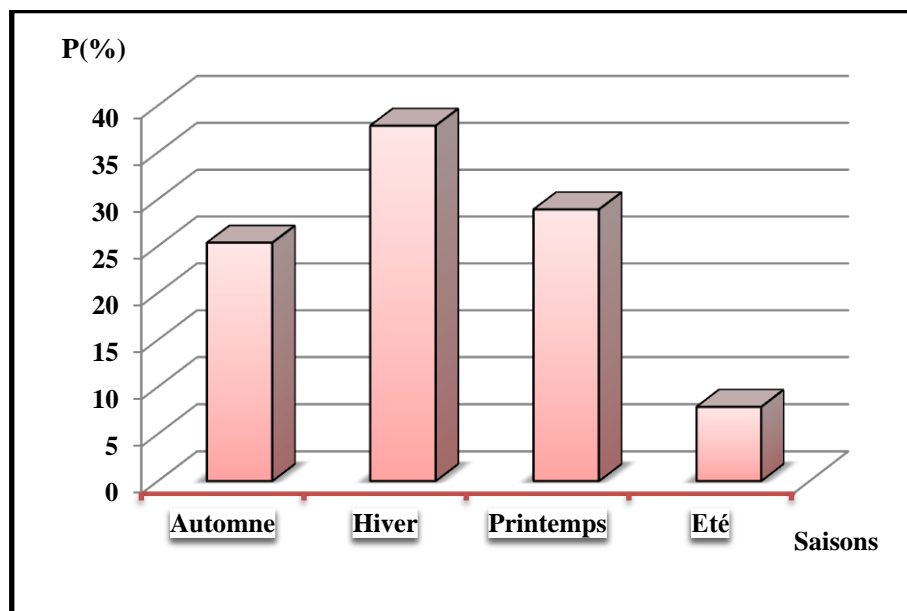


Figure 9. Répartition saisonnière des précipitations de la forêt de Djebel Ouahch

2.2. Correction des températures

La température représente un facteur limitant de toute première importance car, elle contrôle l'ensemble des phénomènes métaboliques et conditionne de ce fait la répartition de la totalité des espèces et des communautés d'êtres vivants dans la biosphère (Ramade, 1984). La température est donc l'un des éléments majeurs influençant le climat d'une région.

Selon Seltzer on a :

- **M** diminue de **0.7°C** tous les **100m** d'élévation
- **m** diminue de **0.45°C** tous les **100m** d'élévation

Tableau 5. Correction des températures mensuelles (1996-2015)

Station	Constantine			Haute altitude			Basse altitude		
T° C	M	m	M+m/2	M	m	M+m/2	M	m	M+m/2
Mois									
Janvier	12.6	2.3	7.45	9.48	0.3	4.89	12.21	2.05	7.13
Février	12.6	2.1	7.36	9.48	0.1	4.79	12.21	1.85	7.03
Mars	16.6	4.7	10.68	13.48	2.7	8.09	16.21	4.45	10.33
Avril	20.7	7.1	13.86	17.58	5.1	11.34	20,31	6.85	13.58
Mai	25.6	10.4	17.99	22.48	8.4	15.44	25.21	10.15	17.68
Juin	31.4	14.9	23.13	28.28	12.9	20.59	31.01	14.65	22.83
Juillet	35.2	18.3	26.74	32.08	16.3	24.19	34.81	18.05	26.43
Aout	34.9	18.4	26.66	31.78	16.4	24.09	34.51	18.15	26.33
Septembre	29.5	15.7	22.60	26.38	13.7	20.04	29.11	15.45	22.28
Octobre	25.2	12.2	18.69	22.08	10.2	16.14	24.81	11.95	18.38
Novembre	17.7	6.9	12.27	14.58	4.9	9.74	17.31	6.65	11.98
Décembre	13.4	3.0	8.21	10.28	1.0	5.64	13.01	2.75	7.88
Moy	22.95	9.67	16.30	19.83	7.67	13.75	22.56	9.42	15.99

La température moyenne annuelle dans la station de Constantine est de 16.30°C et dans les hautes altitudes dans la forêt de Pin pignon et de 13.75°C, alors que les basses altitudes la température est égale 15.99°C. Le maximum des températures minimales est observé au mois d'août atteint 18.4°C. Les valeurs les plus faibles sont enregistrées pendant le mois de janvier (2.3°C).

L'étude des moyennes des maxima montre que les plus basses d'entre elles sont atténuées en janvier (12.6°C). Les valeurs les plus élevées sont observées au mois d'août enregistrant 34.9°C.

Tableau 6. Les gradients mensuels des minima, des maxima et des moyennes mensuelles de Constantine

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
T° max	12,6	12,6	16,6	20,7	25,6	31,4	35,2	34,9	29,5	25,2	17,7	13,4
T° min	2,3	2,1	4,7	7,1	10,4	14,9	18,3	18,4	15,7	12,2	6,9	3
T° moy	7,45	7,36	10,68	13,86	17,99	23,13	26,74	26,66	22,6	18,69	12,27	8,21

Tableau 7. Les gradients mensuels des minima, des maxima et des moyennes des hautes altitudes de forêt

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
T° max	9,48	9,48	13,48	17,58	22,48	28,28	32,08	31,78	26,38	22,08	14,58	10,28
T° min	0,3	0,1	2,7	5,1	8,4	12,9	16,3	16,4	13,7	10,2	4,9	1
T° moy	4,89	4,79	8,09	11,34	15,44	20,59	24,19	24,09	20,04	16,14	9,74	5,64

Tableau 8. Les gradients mensuels des minima, des maxima et des moyennes des basses altitudes de forêt

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
T° max	12,21	12,21	16,21	20,31	25,21	31,01	34,81	34,51	29,11	24,81	17,31	13,01
T° min	2,05	1,85	4,45	6,85	10,15	14,65	18,05	18,15	15,45	11,95	6,65	2,75
T° moy	7,13	7,03	10,33	13,58	17,68	22,83	26,43	26,33	22,28	18,38	11,98	7,88

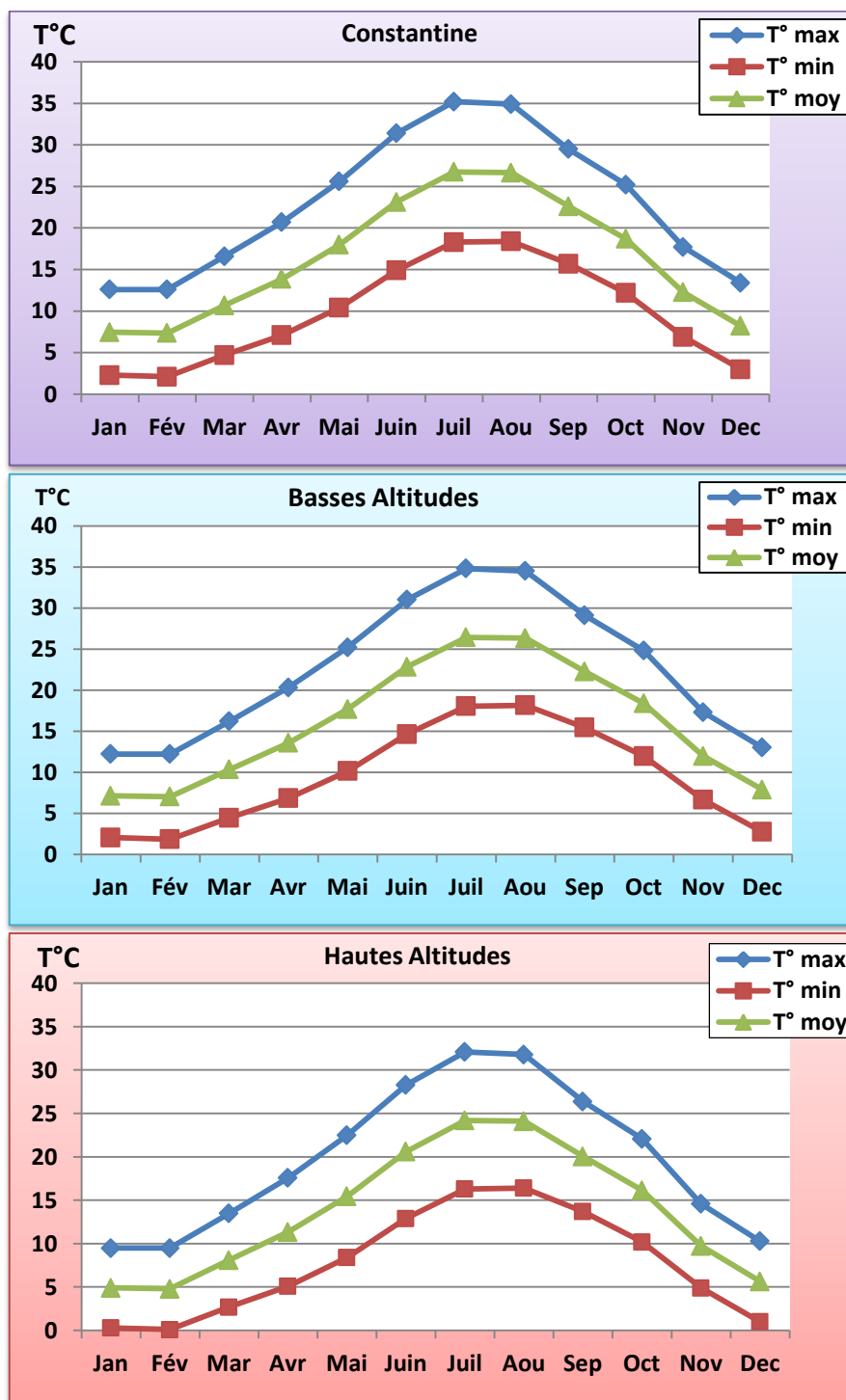


Figure 10. Moyennes mensuelles des températures dans les trois stations (1996-2015)

2.3. Synthèse Bioclimatique

2.3.1. Diagramme ombrothermique

Les courbes des valeurs mensuelles des températures et des précipitations le long de l'année permettent par ailleurs d'identifier la période de sécheresse relative et la durée de la saison relativement humide, de même que divers seuils dans les valeurs des températures et des précipitations mensuelles.

Le diagramme ombrothermique du Gaussen est utilisable dans le monde entier. Il est construit à partir des courbes des moyennes des précipitations et des températures, selon l'échelle ($P \leq 2T$).

Le diagramme ombrothermique du Gaussen fait apparaître deux périodes bien délimitées :

- ❖ Une période sèche relativement courte, s'étala du mois du Mai jusqu'au début du mois de septembre ;
- ❖ Une période humide s'étal sur le reste de l'année (Fig 11)

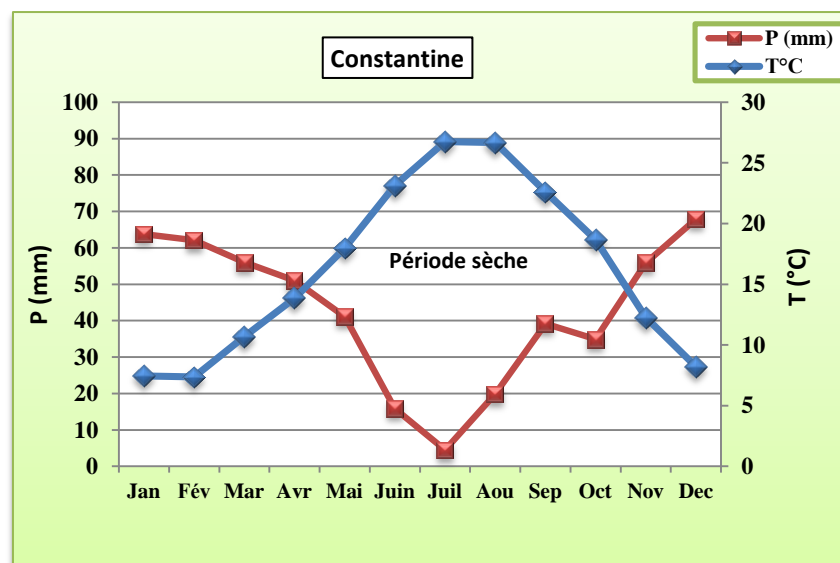


Figure 11. Diagramme ombrothermique de la station de Ain El bey

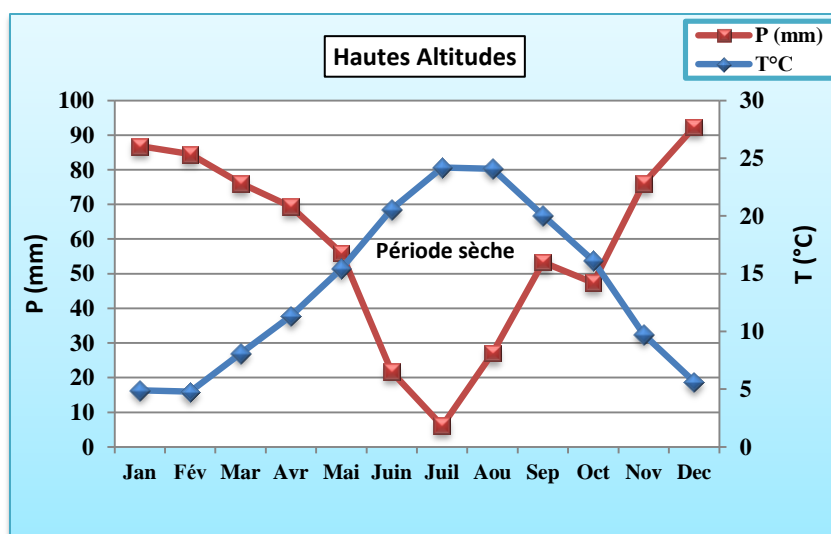


Figure 12. Diagramme ombrothermique des hautes altitudes de la forêt de Djebel Ouahch

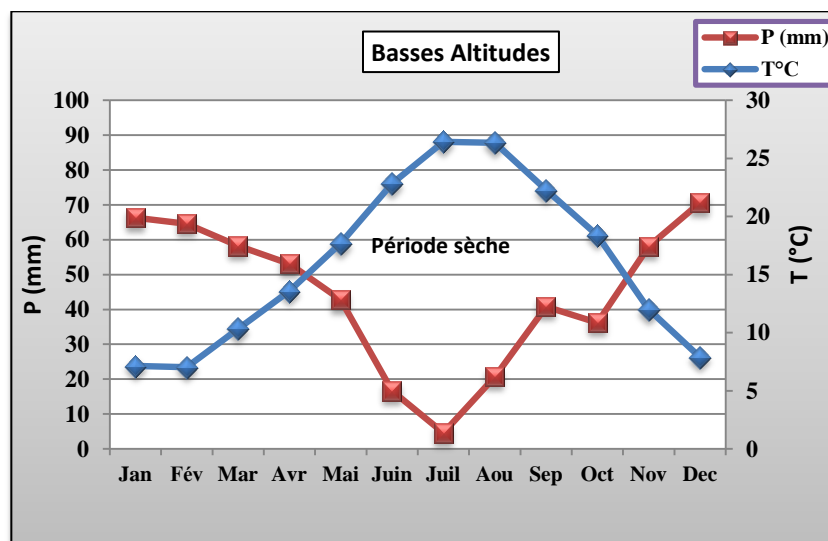


Figure 13. Diagramme ombrothermique des basses altitudes de la forêt de Djebel Ouahch

2.3.2. Etages bioclimatiques d'Emberger

Les précipitations exercent une action prépondérante pour la définition de la sécheresse globale du climat. Les limites de séparation entre les différents étages climatiques restent encore imprécises. Il est intéressant de signaler qu'il ne s'agit pas de lignes au sens géométrique du mot, mais plutôt de bandes de transition mixte. À ce titre, Emberger a bien précisé que sur le diagramme, les limites ont été tracées là où le changement de la végétation a été observé (De Granville, 1971).

Le quotient d'Emberger est spécifique du climat méditerranéen, il est le plus fréquemment utilisé en Afrique du Nord. Le quotient Q_3 a été formulé de la façon suivante :

$$Q_3 = [3,43P / M - m]$$

Q: quotient pluviométrique

M: moyenne du maxima du mois le plus chaud en degré absolu.

m: moyenne du minima du mois le plus froid en degré absolu.

P : précipitation annuelle en mm.

Tableau 9. Quotient d'Emberger

Stations	Paramètres	P (mm)	M °C	m °C	Q ₃
Constantine (Ain El bey)		512.1	35.2	2.1	53.07
Dejbel Ouahch (basse altitude)		532.6	34.81	1.85	55.43
Djebel Ouahch (haute altitude)		696.5	32.08	0.10	74.70

Le Q_3 nous a permis de localiser notre station d'étude sur le climagramme d'Emberger, à un climat semi-aride à hiver frais influencé par le climat subhumide par suite à la position de la station de Ain El bey (Fig 14).

Sur une période de 20 ans, la région de Constantine a enregistré un climat semi aride à hiver frais.

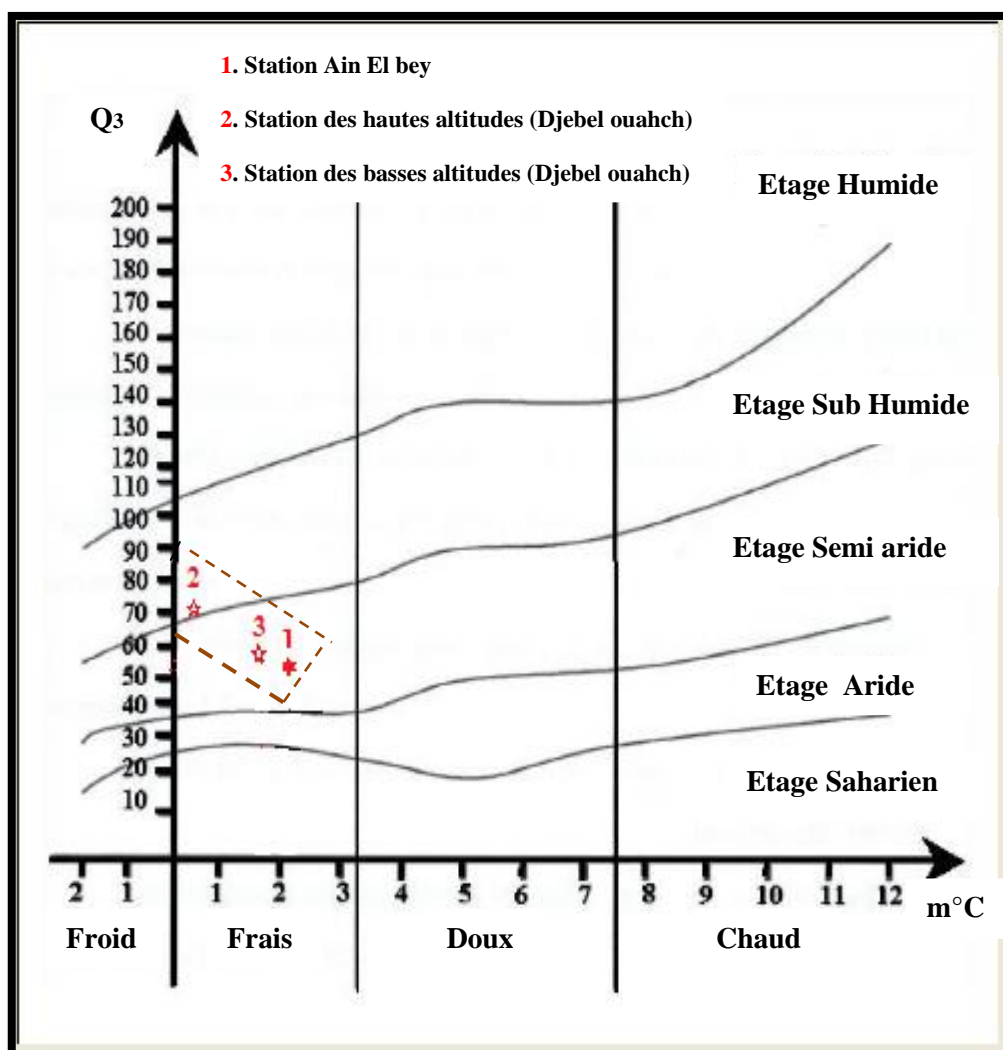


Figure 14. Climogramme d'Emberger des trois stations

2.4. Humidité atmosphérique

L'Humidité a une grande importance pour la végétation forestière, c'est la source de toutes les précipitations, elle contrôle en outre pour une large part les taux d'évaporation du sol et de la couverture végétale.

L'évolution mensuelle de l'humidité calculée dans la station de Ain El bey sur une période de vingt ans (1996-2015) est représentée dans la figure 15 qui montre que l'humidité est souvent supérieure à 50 % sauf en été avec une valeur minimale de l'ordre 47,6 % au mois de juillet. La valeur maximale du mois de janvier est de 78,8 % ceci indique que l'atmosphère se trouve dans un état plus ou moins proche de la condensation.

Tableau 10. Humidité de l'air durant la période 1996-2015

Mois	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc
H (%)	78,8	76,9	73,0	70,5	65,7	53,7	47,6	51,3	64,5	68,2	75,7	79,3

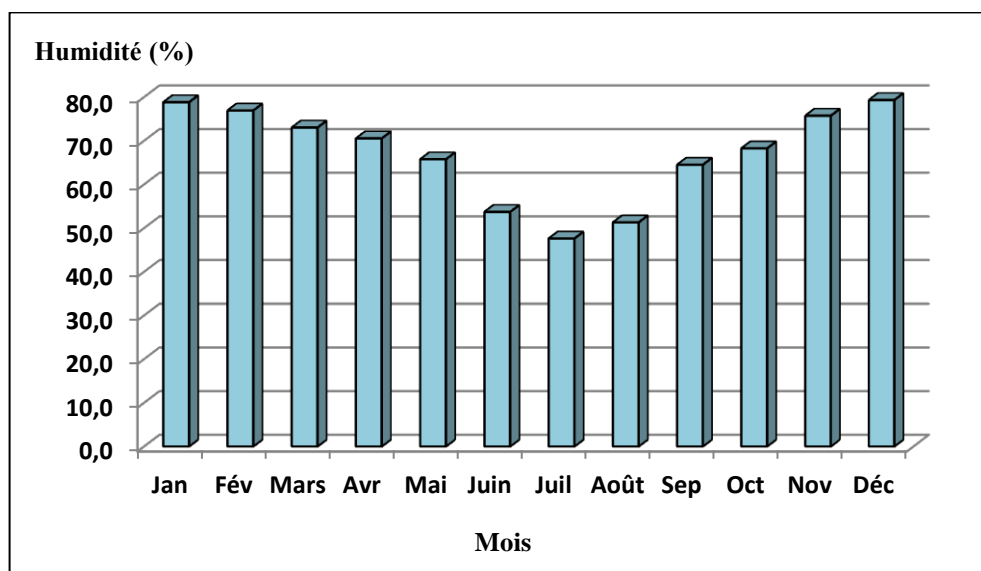


Figure 15. Moyenne mensuelle de l'humidité (station d'Ain El bey 1996-2015)

L'évolution mensuelle de l'humidité maximale est variée entre 73,9% au moi juillet et 92,7% au moi de janvier, alors que l'humidité minimale est variée entre 24% au moi juillet et 54,8% au moi de janvier.

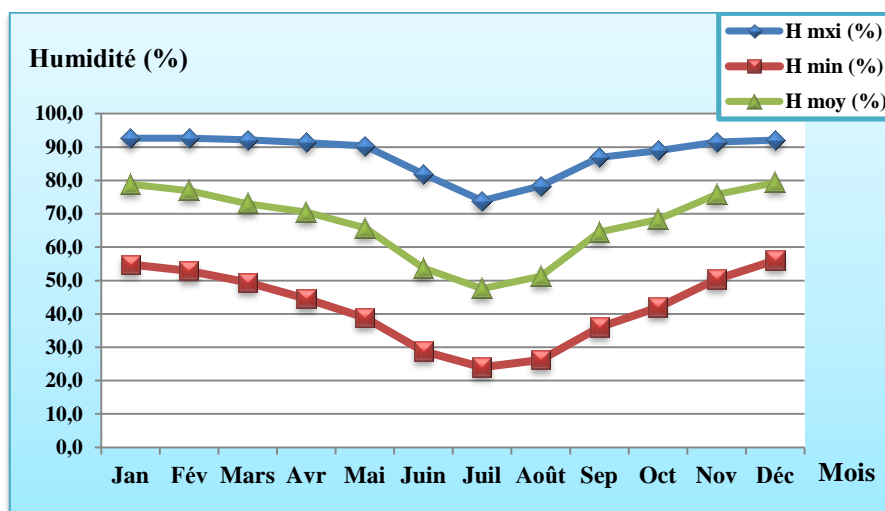


Figure 16. Moyennes mensuelles de l'humidité maximale et minimale (1996-2015)

2.5. Vents

Jusqu'à une vitesse de 100 km/h, le vent ne provoque que peu de dégâts aux forêts, abattant seulement quelques arbres malades ou au système racinaire déficiente De 100 à 150 km/h apparaissent des chutes ou bris d'arbres appelés chablis, mot qui désigne également l'arbre abattu, qui peuvent être plus ou moins importants selon les caractéristiques du peuplement et de la station. Au delà de 150 km/h, bien peu de peuplements résistent (Lemmnauor, 2002).

❖ Vents du Nord Ouest et du Nord

Ce sont les vents dominants. Ils soufflent du nord-ouest et du nord. Une grande partie des précipitations provient de l'ascendance forcée de ces masses d'air sur les monts de la région de Constantine. Ils sont fréquents en l'hiver.

❖ Vents du Sud

Secs et chauds, les vents du Sud qui soufflent surtout au été et à la fin d'automne, ramènent avec eux une quantité appréciable de sable et de limon. Peut être nuisible pour la végétation en accentuant l'évaporation.

Tableau 11. Moyennes de vitesse de vent durant la période 1997-2015

Mois	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc
Vent (m/s)	2,7	3,2	2,9	2,5	2,4	2,6	2,5	2,3	2,2	2,2	2,5	2,3

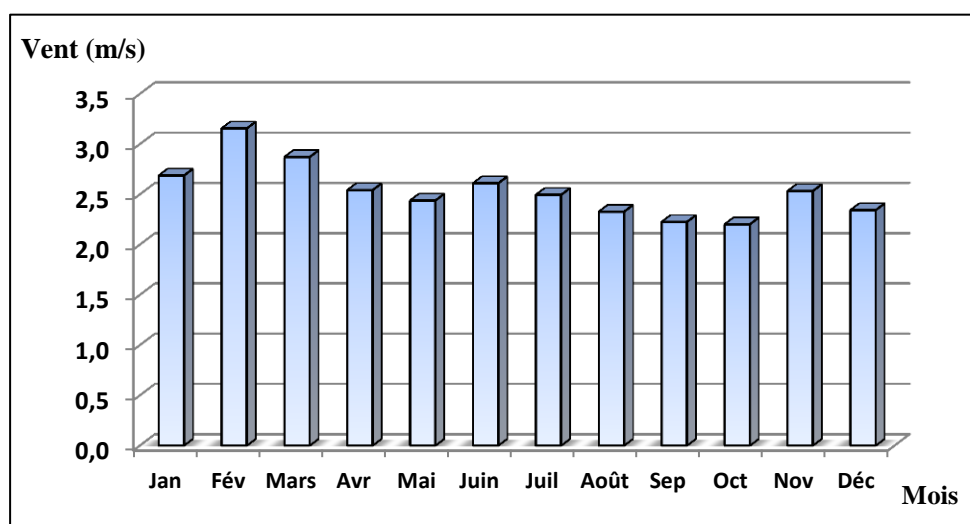
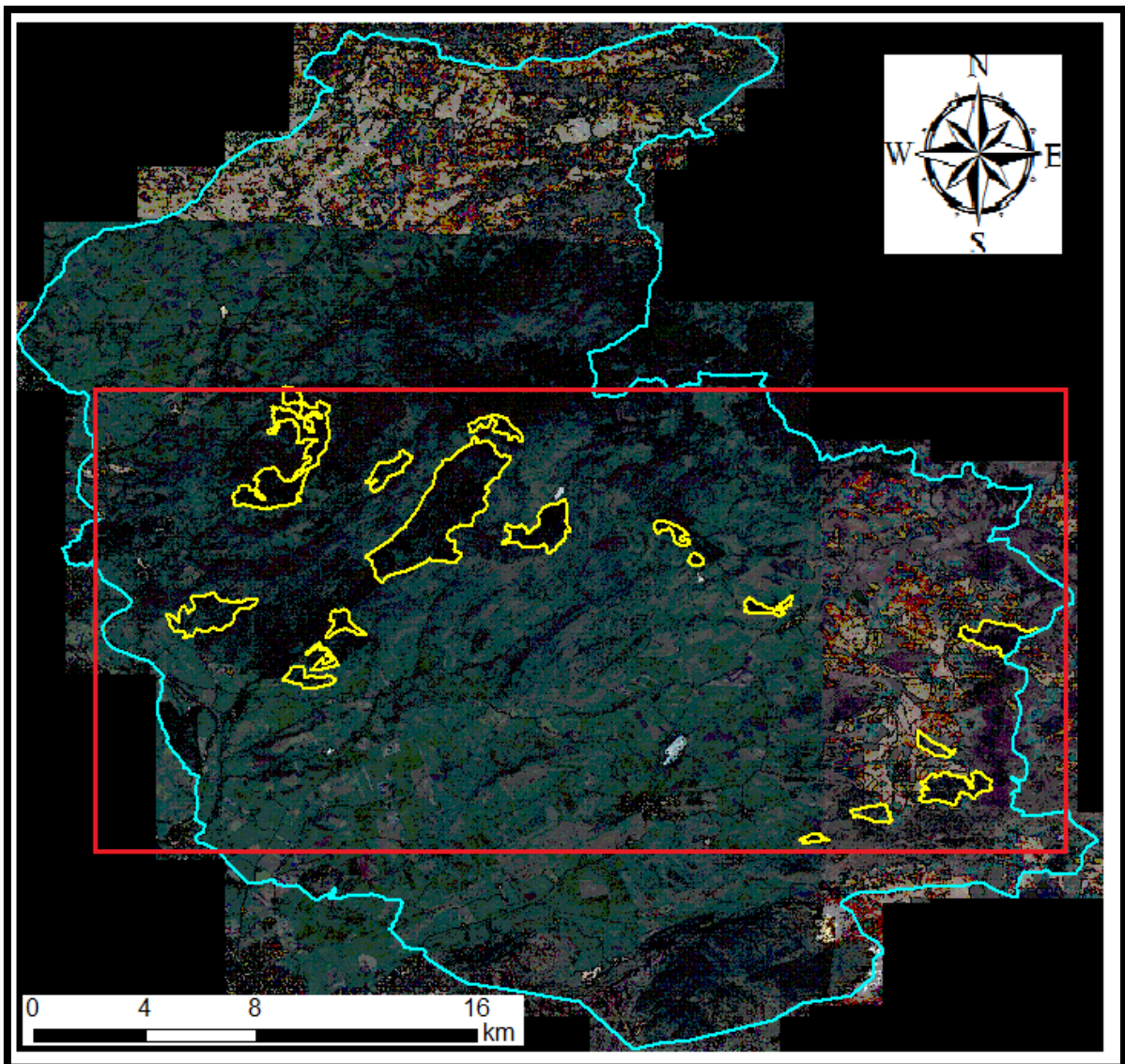


Figure 17. Moyenne mensuelle de vent (1996-2015)

3. Site d'étude

L'ensemble des données utilisées au cours de ce travail provient des placettes-échantillons installées au niveau des neuf stations de peuplement de Pin pignon situés dans la région de Djebel Ouahch. Il s'agit des forêts de Kef lekhal, Matlegue, Oued leghda, El haddadj, Draa Nagah, El bier, El hambli, Ben yakoub et Tassenga.



Carte 3. Sites d'échantillonnage des peuplements de pin pignon dans la région de Djebel Ouahch

Tableau 12. Caractéristiques des sites d'étude

Nom de zone	Coordonnées géographiques	Exposition	Altitude (m)	Superficie (ha)	Année de plantation	Nombre de pied	Stade d'évolution
Kef lekhel (Oued leghda, Matlegue, El haddadj)	-36°25'00.43''N -6°43'05.56''E	Nord-Ouest	760-1110	1279	1974	70515	Haut perchis, Jeune futaie
Draa Nagah	-36°22'34.57''N -6°41'57.09''E	Nord	770-960	327,14	1974	6522	Jeune futaie
El bier	-36°24'12.63''N -6°48'04.27''E	Nord	1050	193,24	1974	3577	Jeune futaie
Tassenga	-36°24'11.00''N -6°50'39.25''E	Nord	850	50,62	1974	1403	Jeune futaie
Ben yakoub	-36°22'44.79''N -6°52'19.06''E	Nord-est	790	39,75	1974	1684	Haut perchis
El hambli	-36°19'19.96''N -6°55'42.78''E	Sud-est	800-1000	388,25	1974	7766	Haut perchis

Gérée par la Conservation des Forêts de Constantine, la station forestière « Kef lekhel » appartenant au nord de la région de Djebel Ouahch est formée d'une grande forêt de Pin pignon « Matlegue, Oued leghda et El Haddadj » (qui a été implanté en 1974).

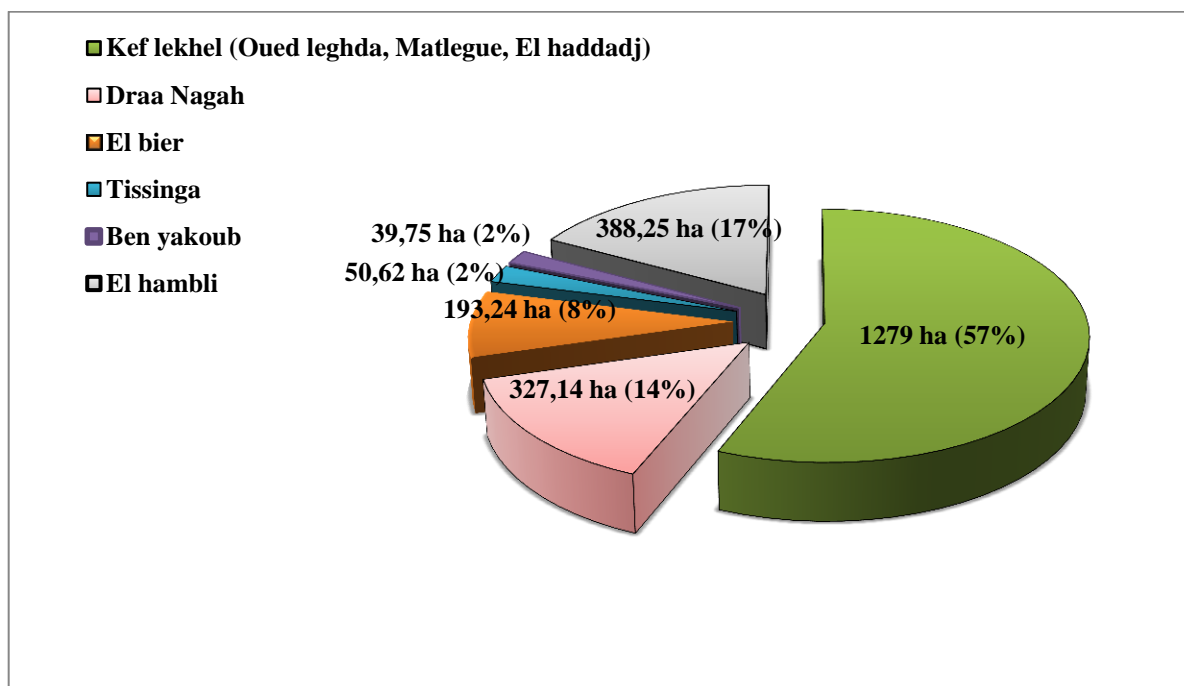


Figure 18. Répartition des peuplements de pin pignon dans la région du Djebel Ouahch

❖ **Forêt de Kef lekhel**

La superficie totale de plantation en pin pignon dans la zone de Kef lekhel est estimée à 1279 ha, son Coordonnées géographiques entre (36°25'00.43''N et 6°43'05.56''E) et son exposition générale est Nord -Est. Cette zone englobe la forêt de Matlegue, Oued leghda et el Haddadj.

Elle s'éloigne de 11 à 12 Km de Constantine, elle est limité au :

-Nord : par la région de Zighoud Youssef.

-Sud : par l'arboretum de Draa Naga, vers elkhroub.

-Est : vers El Aria.

-Ouest : par la pépinière de Djebel – Ouahch, vers Constantine.

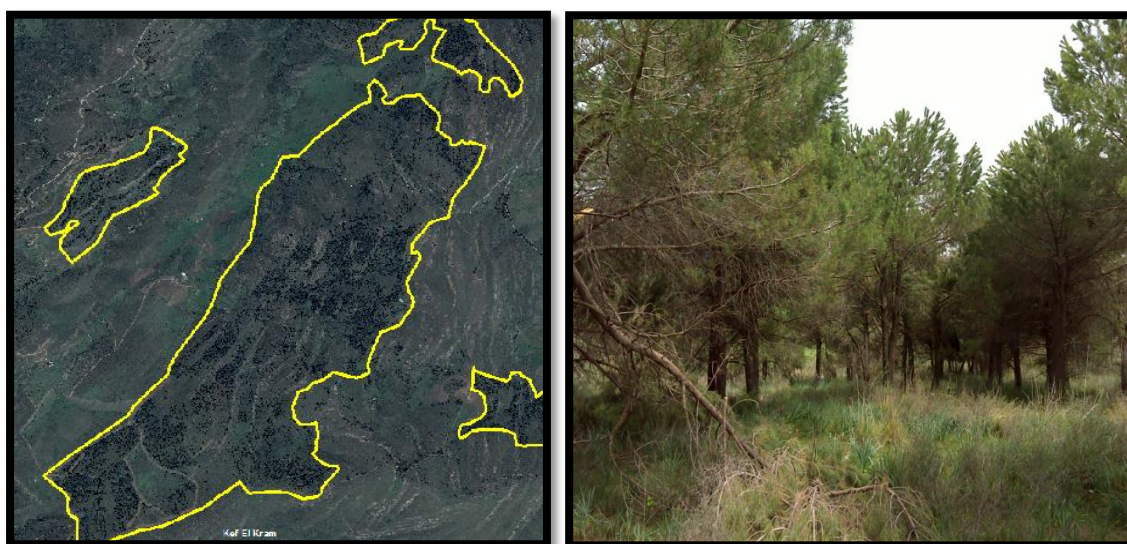


Photo 9. Peuplements de pin pignon de la forêt de Kef lekhel (2014)

❖ **Forêt de Draa Nagah**

La station forestière « Draa Nagah » situe entre la longitude (6°41'57.09''E) et la latitude (36°22'34.57''N) à (770-960m) d'altitude. Il occupe une superficie totale de 327.14ha, sur le territoire de la commune d'El khroub.

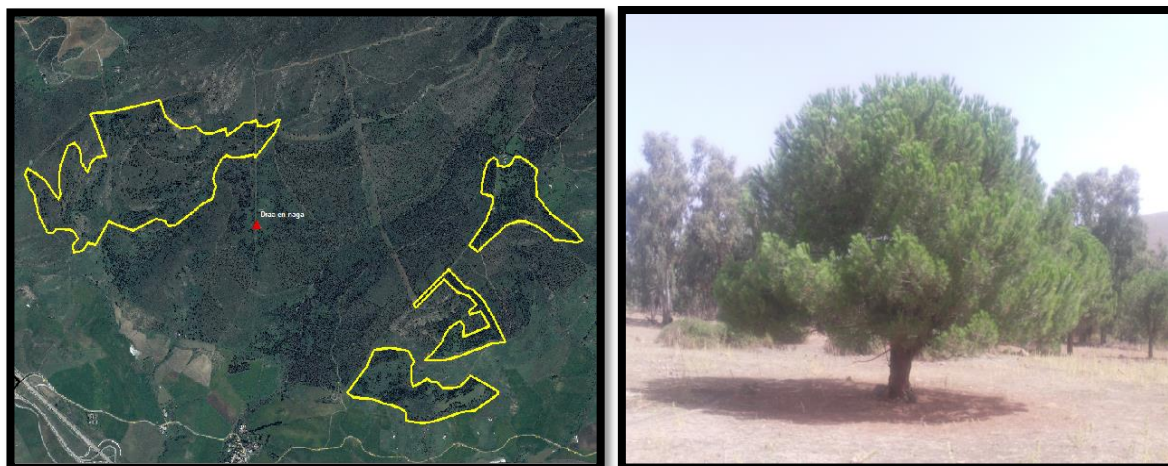


Photo 10. Peuplements de pin pignon de la forêt de Draa Nagah (2014)

❖ **Forêt d'El bier**

La station de forêt « d'El bier » situe au nord de la commune d'Ibn badis, Il occupe une superficie totale de 193,24 ha, son Coordonnées géographiques entre ($36^{\circ}24'12.63''N$ et $6^{\circ}48'04.27''E$).

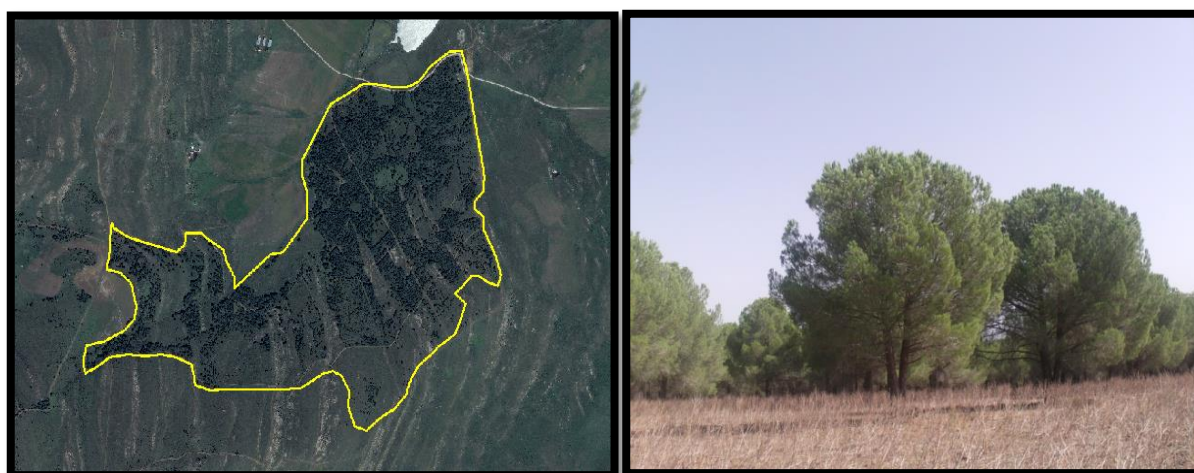


Photo 11. Peuplements de pin pignon de la forêt El bier (2014)

❖ **Forêt de Tassenga**

La superficie totale de plantation en Pin pignon dans la station de « Tassenga » est estimée à 50,62 ha, son situation géographique est : $36^{\circ}24'11.00''N$ et $6^{\circ}50'39.25''E$ et son exposition générale est le Nord. Elle est située dans le territoire de la commune d'Ibn badis.



Photo 12. Peuplements de pin pignon de la forêt de Tassenga (2015)

❖ **Forêt de Ben yakoub**

La station forestière « Ben yakoub » située entre la longitude ($6^{\circ}52'19.06''E$) et la latitude ($36^{\circ}22'44.79''N$) à 790m d'altitude. Il occupe une superficie totale de 39,75ha, sur le territoire de la commune d'Ibn badis, limité au nord par la zone de Douar Ouled Derradj et au sud par la région d'El Hambli.

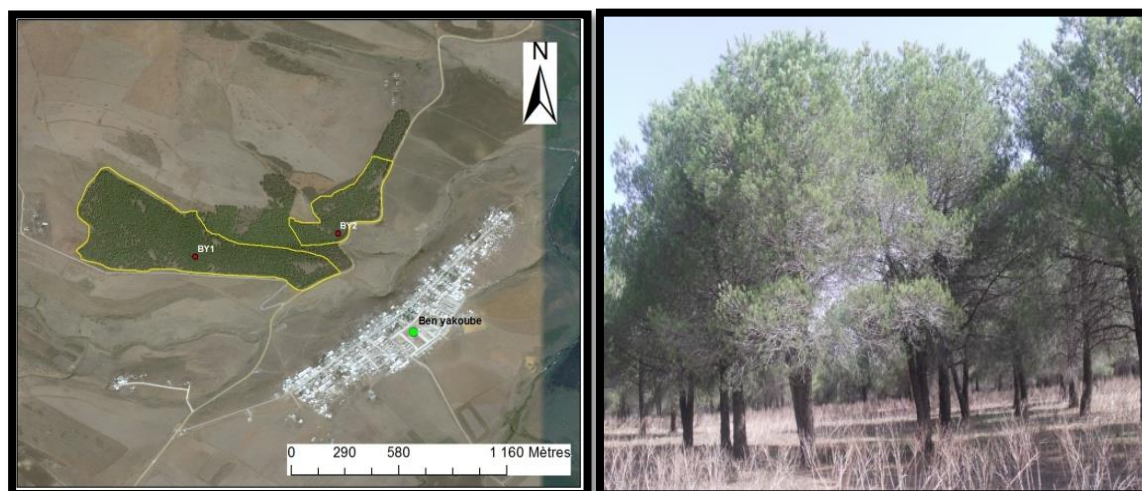


Photo 13. Peuplements de pin pignon de la forêt de Ben yakoub (2015)

❖ **Forêt d'El Hambli**

La station de forêt « d'El Hambli » située à l'ouest de la commune d'Ibn badis, limite au nord par la région de ben yakoub, et au sud par la commune d'El haria. Il occupe une superficie totale de 388,25ha, son situation géographique est : ($36^{\circ}19'19.96''N$) et ($6^{\circ}55'42.78''E$).

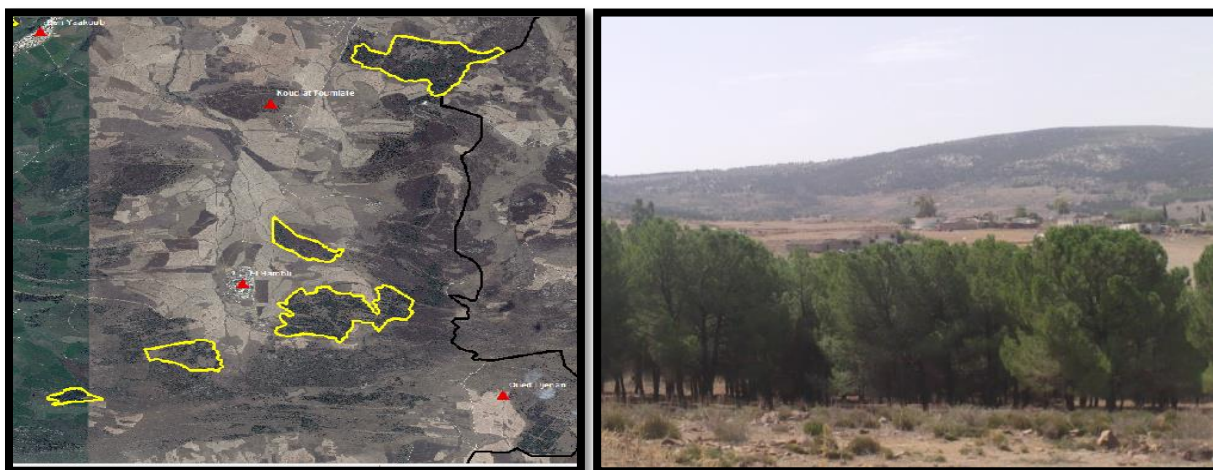
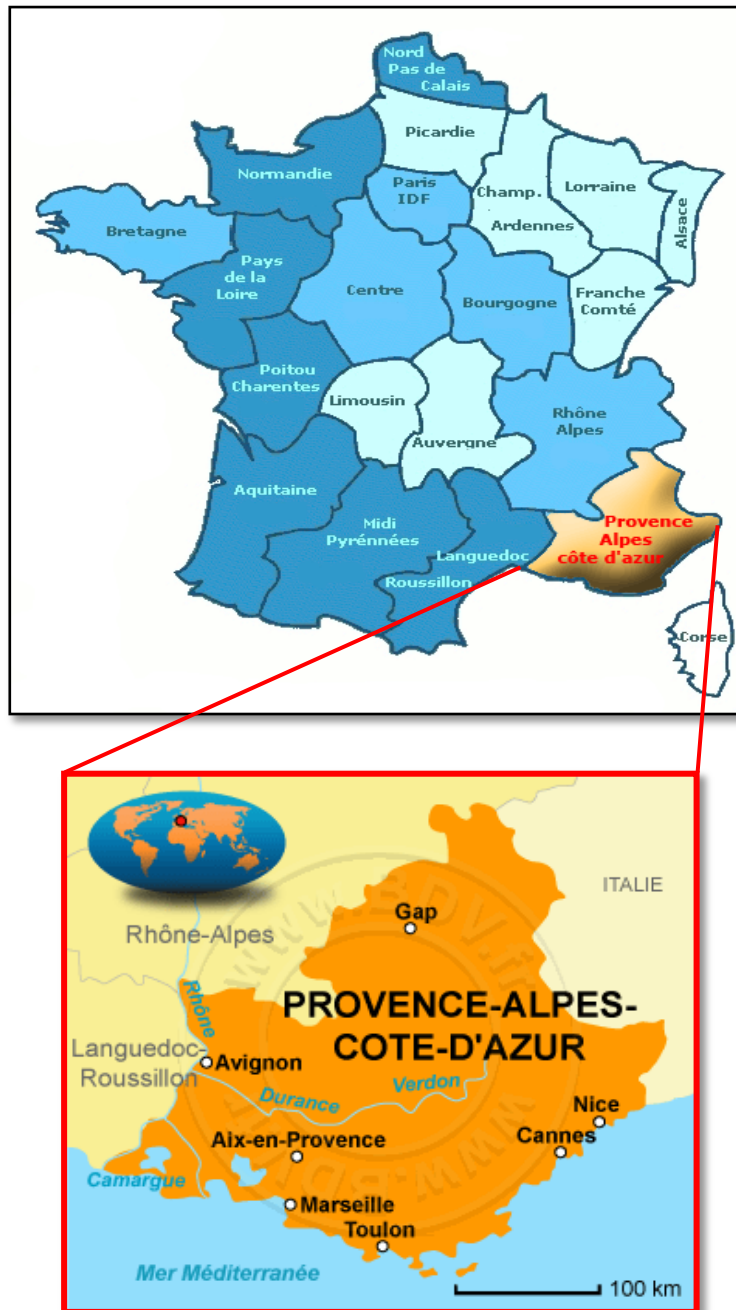


Photo 14. Peuplements de pin pignon de la forêt d'El Hambli (2015)

II. Zone de Provence-Alpes-Côte d'Azur « France »

1. Situation géographique

La région Provence-Alpes-Côte d'Azur, se situe au sud-est de la France, bordée au sud par la mer méditerranée et frontalière avec l'Italie à l'est. Ses coordonnées géographiques est de 43.574342 de latitude et 5.747109 de longitude.



Carte 4. Localisation géographique de la région de Provence-Alpes-Côte d'Azur (France)
(<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/2/26/Provence-Alpes->)

2. La géologie

Cette zone appartient au plateau de Rians dans le massif forestier de la Sainte Victoire, il s'agit d'un plateau calcaire, avec des passées dolomitiques : ces couches dolomitiques se traduisent par des sols localement moins riches en carbonate de calcium (et donc de calcaire actif) remplacé en partie par du carbonate de magnésium. C'est ce qui permet la présence sur place du pin maritime que l'on trouve en mélange avec le pin pignon et le pin d'Alep sur cette zone.

Les couches de calcaire sont fissurées, permettant aux racines de pénétrer en profondeur par endroits et d'atteindre des poches d'altérite jusqu'à plusieurs mètres. Ces altérites sont des argiles de décarbonatation, parfois argiles sableuses sur les zones dolomitiques. Les couches superficielles prennent souvent la forme de lapiaz. L'horizon superficiel est en partie décarbonaté sur 5 à 15 cm, là où l'érosion n'a pas trop amputé le sol. Les poches d'altérite sont aussi en partie décarbonatées mais pas entièrement.

3. Le climat

La région Provence-Alpes-Côte d'Azur est connue pour son climat méditerranéen chaud et ses journées interminables de soleil d'été. C'est l'une des régions les plus ensoleillées de France. Cependant, des microclimats et des variations dans la région vont du alpin au nord de Nice au climat continental au nord du Vaucluse.

3.1. Précipitation

La distribution des précipitations dans la région Provence-Alpes-Côte d'Azur est irrégulière comme le montre le tableau : le maximum de pluie est atteint au mois de Septembre et Novembre (103.1mm, 102.2mm), tandis que les mois de Juillet et Aout ne reçoivent que de faible quantité (24.3 mm, 29.1mm).

Tableau 13. Variabilité des précipitations mensuelles de la zone Provence-Alpes-Côte d'Azur

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
1991-2016	69,1	43,8	44,6	71,1	61,3	41,2	24,3	29,1	103,1	90,3	102,2	60,5

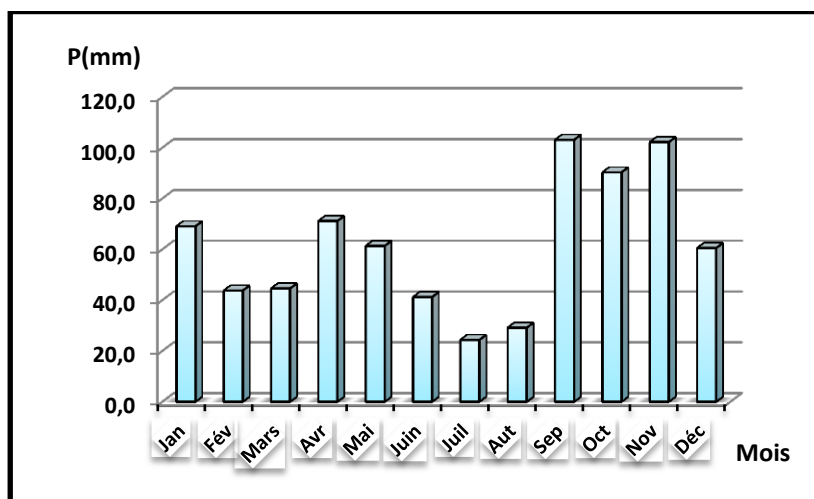


Figure 19. Moyennes mensuelles des précipitations de la zone Provence-Alpes-Côte d'Azur (1991-2016)

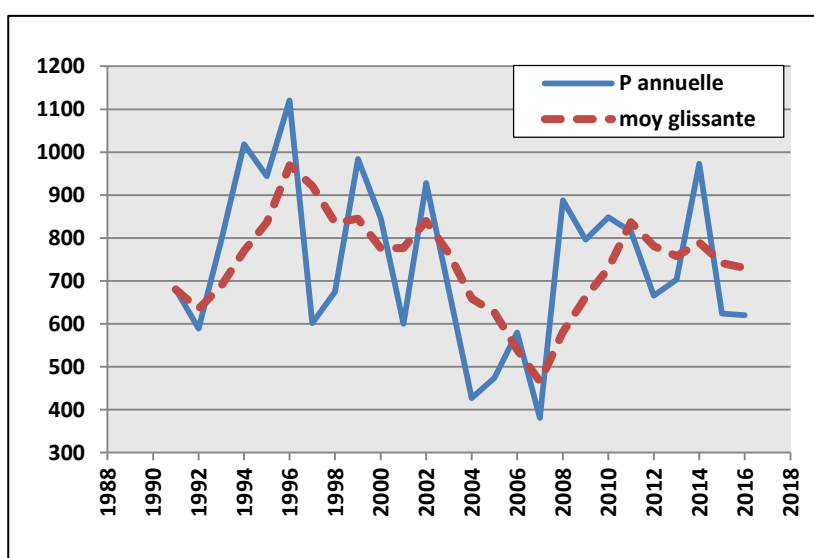


Figure 20. Moyennes annuelle et glissante des précipitations de la zone Provence-Alpes-Côte d'Azur (1991-2016)

Suivant le tableau 14, la zone présente un régime saisonnier de type APHE pendant la période (1991-2016). Il est très intéressant de mentionner que le régime était auparavant de type APHE. On peut traduire ce changement de régime par l'irrégularité de la répartition mensuelle des précipitations, dont les mois de la saison automnal (Septembre, Octobre, Novembre) reçoivent plus de pluie par rapport à la saison printanière (Mars, Avril, Mai).

Tableau 14. Répartition saisonnière des précipitations de la zone Provence-Alpes-Côte d'Azur

Mois	P (mm)	Saisons	Précipitation saisonnières (mm)	P(%)
Septembre	103,1	Automne	295.6	39,91
Octobre	90,3			
Novembre	102,2			
Décembre	60,5	Hiver	173.4	23,41
Janvier	69,1			
Février	43,8			
Mars	44,6	Printemps	177	23,90
Avril	71,1			
Mai	61,3			
Juin	41,2	Eté	94.6	12,77
Juillet	24,3			
Aout	29,1			
Total	740.6	-	614.6	100

Années (1991-2016)

Les pluies sont très nettement groupées pendant le mois d'automne, le maximum se situant généralement en septembre. L'été est la saison sèche, le minimum se situe d'ordinaire en juillet.

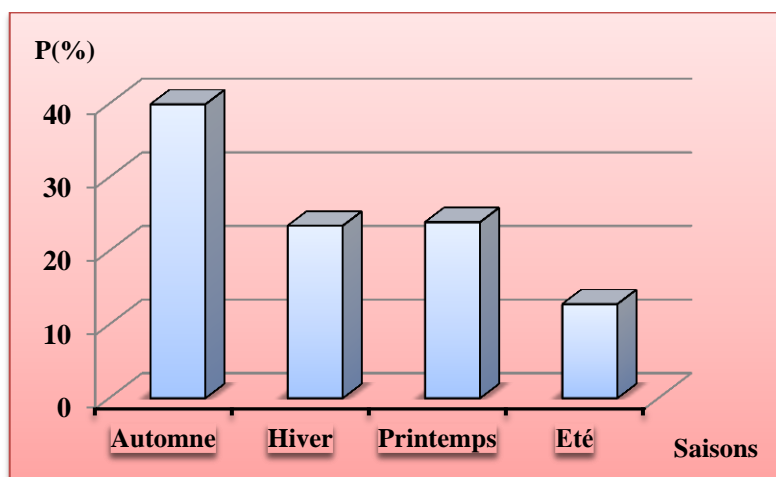


Figure 21. Répartition saisonnière des précipitations de la zone Provence-Alpes-Côte d'Azur (1991-2016)

3.2. Température

La température moyenne annuelle dans la région Provence-Alpes-Côte d'Azur est de 12.49°C. Le maximum des températures minimales est observé au mois de juillet atteint 14.82°C. Les valeurs les plus faibles sont enregistrées pendant le mois de février (0.11°C).

L'étude des moyennes des maxima montre que les plus basses d'entre elles sont atténuées en janvier (8.95°C). Les valeurs les plus élevées sont observées au mois de juillet enregistrant 28.60°C.

Tableau 15. Gradient mensuel des minima, des maxima et des températures moyennes

T°C \ Mois	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aut	Sep	Oct	Nov	Déc	Moy
T°C moy	4,72	5,01	8,14	10,70	14,88	18,97	21,71	21,62	17,29	13,21	8,30	5,33	12.49
T°C min	0,49	0,11	2,77	5,21	8,96	12,48	14,82	14,73	11,48	8,54	4,11	1,25	7.08
T°C max	8,95	9,91	13,50	16,19	20,80	25,45	28,60	28,50	23,11	17,87	12,48	9,42	17.90

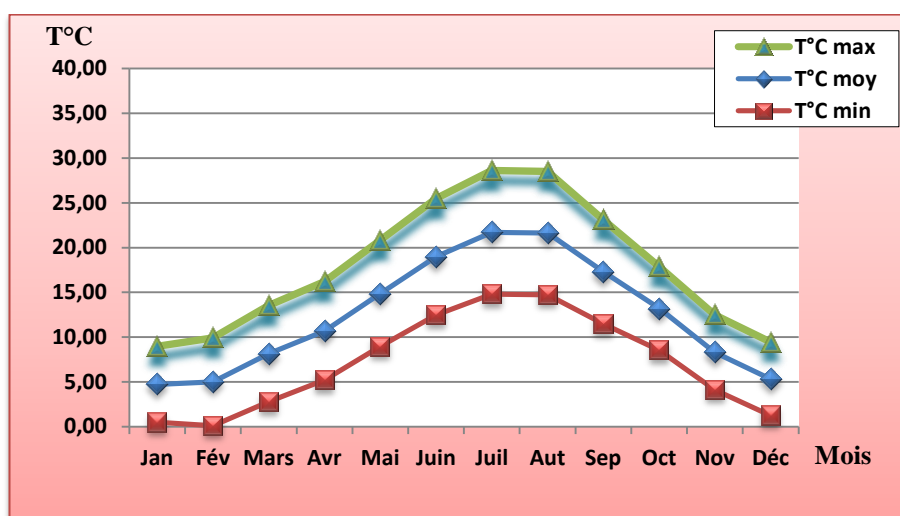


Figure 22. Moyennes mensuelles des températures dans la zone Provence-Alpes-Côte d'Azur (1991-2016)

Les courbes 23 montrent des variations des températures et des précipitations le long des l'année (1991-2016) dans la région de Provence-Alpes-Côte d'Azur.

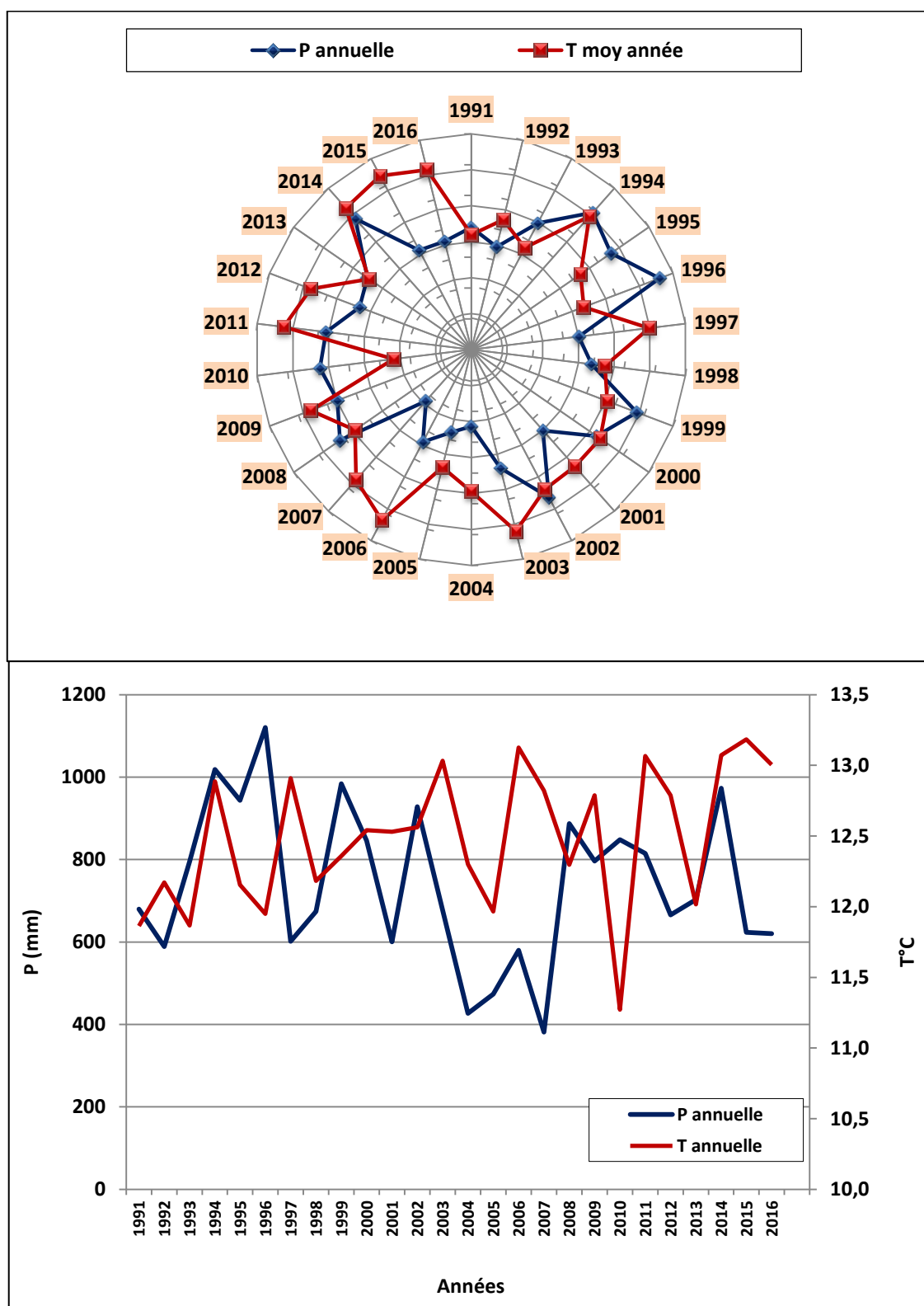


Figure 23. Variation des températures et des précipitations annuelles de la zone Provence-Alpes-Côte d'Azur

1. Echantillonnage et installation des placettes

L'élaboration des différentes cartes est réalisée à partir du logiciel ARCGIS 10 ; pour cela une méthode a été adoptée : l'intégration des images satellitaires dans le SIG et l'élaboration du plan parcellaire des zones d'étude par une digitalisation des parcelles.

1.1. Approche méthodologique

L'approche méthodologique suivie dans cette étude, consiste à réaliser des mesures dendrométrique sur des peuplements de Pin pignon, au niveau du massif de Djebel El Ouahch et d'analyser les résultats. Au départ, et en accord avec les forestiers, neuf stations de Pin pignon ont été retenue, à savoir la station de Kef lekhel, Matlegue, Oued El Ghda, El haddadj, Draa Nagah, El bier, Tassenga, Ben yakoub et la station d'El hambli.

Cependant, en raison des mauvaises conditions climatiques et des conditions de sécurité, la station **d'Oued El Ghda** n'a finalement pas été retenue.

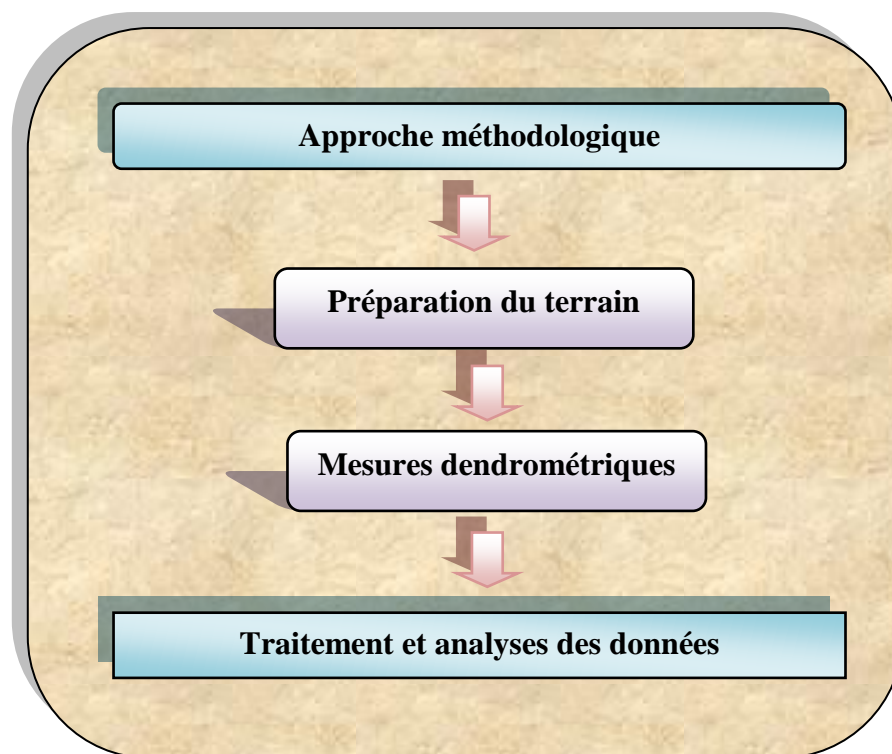


Figure 24. Phases de l'approche méthodologique

1.1.1. Préparation du terrain

C'est une étape, à la fois critique et importante, car elle conditionne la qualité de l'échantillonnage et par conséquent la précision des résultats obtenus sur terrain.

En ce qui concerne le type d'échantillonnage, nous avons opté pour le stratifié, car il permet un échantillonnage proportionnel aux groupes de parcelles homogènes.

Au niveau des stations, les parcelles homogènes du point de vue densité, ont été délimitées à partir des images satellite. La figure 25, décrit les étapes suivies pour la préparation du terrain, de l'acquisition des images jusqu'au comptage des arbres.

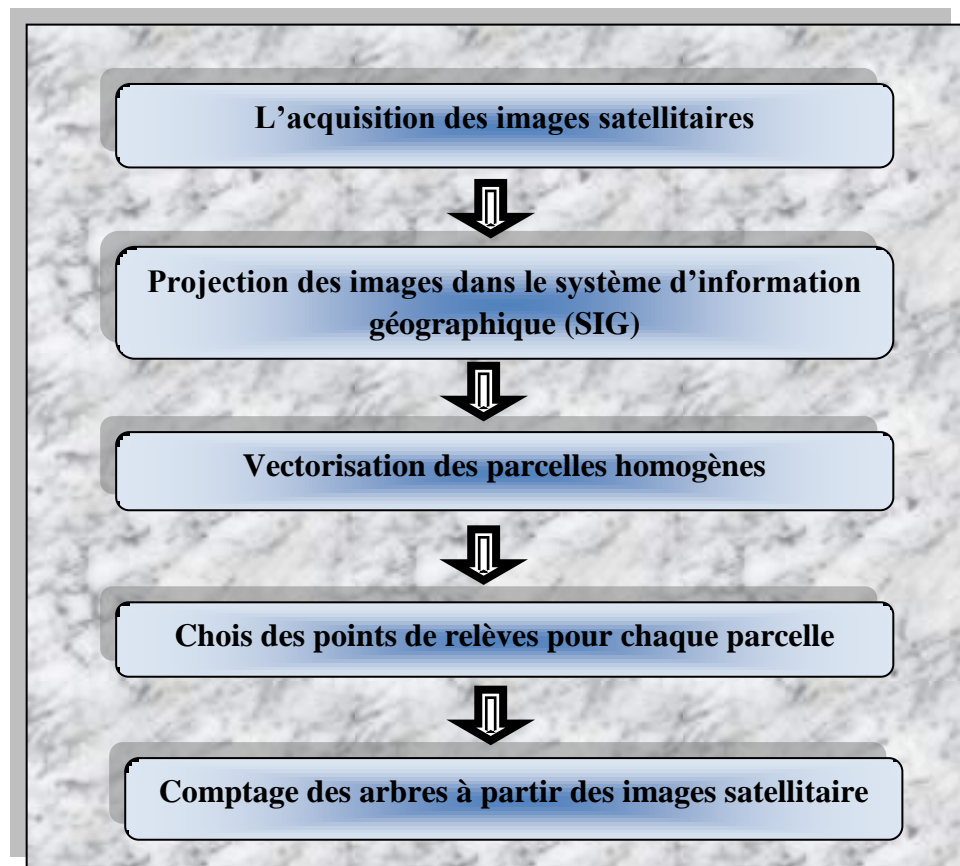
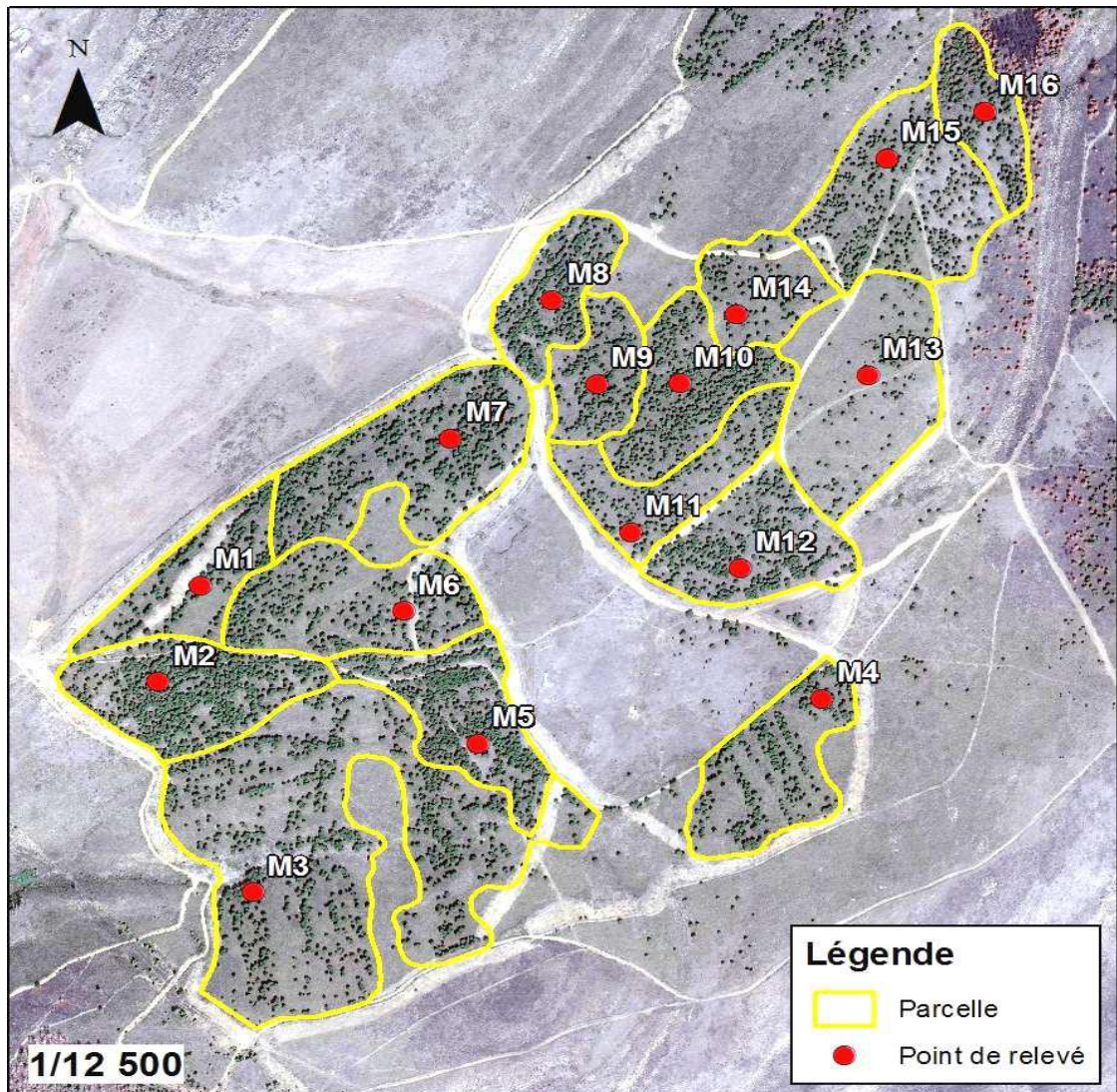


Figure 25. Etapes de la préparation du terrain

Les images satellitaires fournies par le logiciel d'observation de la terre Google Earth sont issues du satellite Digital Globe datant du 16/10/2014, avec une résolution spatiale de 2m. Ces images une fois téléchargées, sont exporté dans un système d'information géographique, puis projeté dans le système de coordonnées WGS84 UTM 31 Nord.

A partir de l'interprétation visuelle de ces images, les peuplements de pin pignon dans les différentes stations ont été divisés en parcelles homogènes selon la densité des arbres (Carte 5). Tous les points de relevés sont transférés vers un GPS pour la localisation sur terrain.



Carte 5. Vectorisation des parcelles homogènes et choix des points de relevé (cas station de Matlegue)

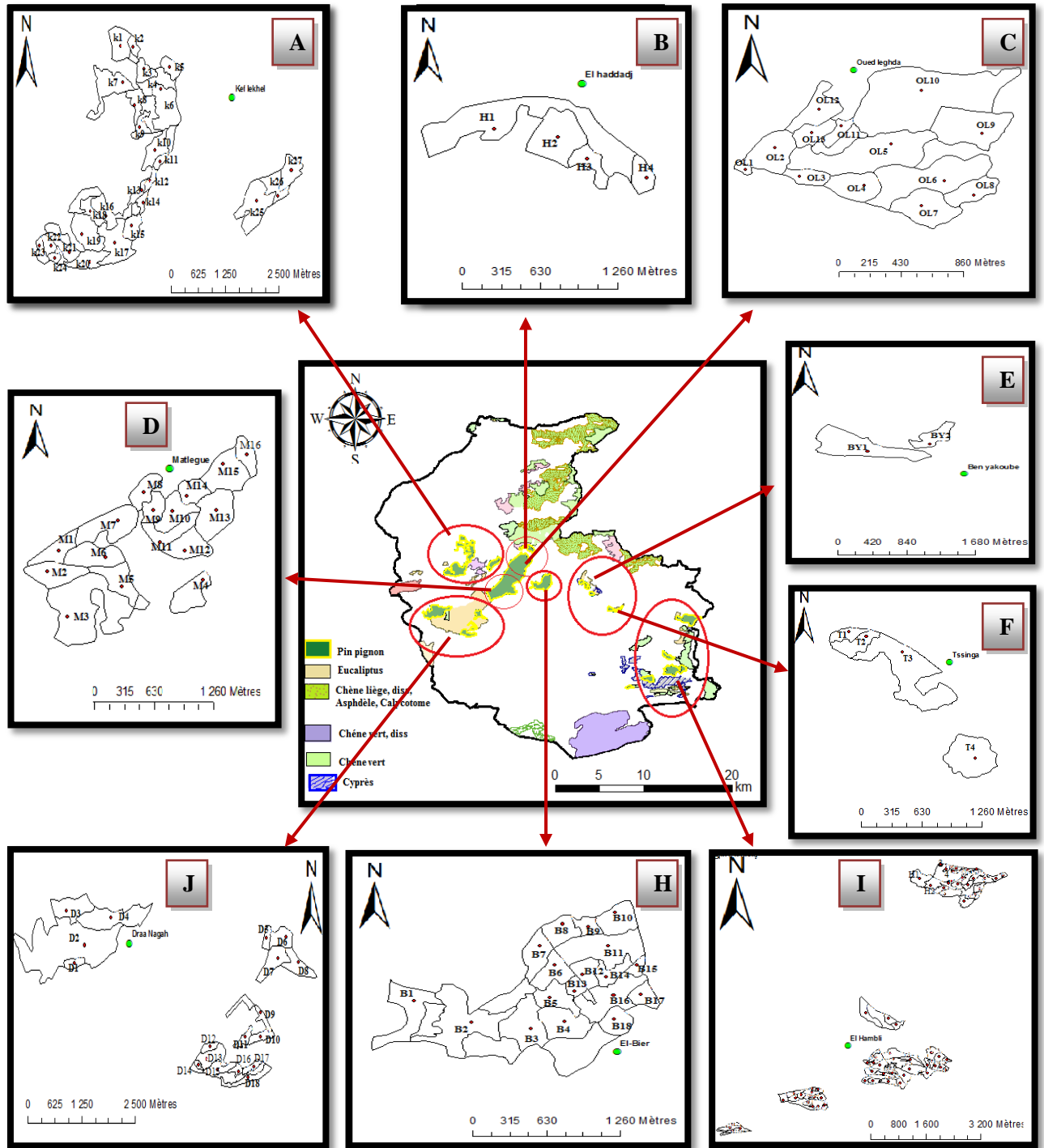


Figure 26. Représentation de l'installation des parcelles existantes dans les peuplements de Pin pignon. **A**: Kef lekhel ; **B**: El haddadj ; **C**: Oued leghda ; **D**: Matlegue ; **E**: Ben yakoub ; **F**:Tassenga ; **J**:Draa nagah ; **H**:El bier ; **I**:El hambli.

1.1.2. Mesures dendrométriques

Cette étape consiste à se déplacer sur terrain et à effectuer le relevé des points choisis, parcelle par parcelle.

La mesure dendrométrique peut également servir à définir et mesurer un certain nombre de critères dendrométriques pour caractériser les peuplements et suivre leur évolution. Ce domaine correspond à la sylviculture et à l'aménagement.

Pour chaque arbre, les paramètres suivants sont mesurés (Fig 27) :

- Le diamètre et la circonférence à 1.30 m du sol (5);
- La hauteur totale (H_t) définie par la longueur de la ligne droite joignant le pied de l'arbre (niveau du sol) à l'extrémité du bourgeon terminal de la tige (3);
- La hauteur du fût (H_f) définie par la longueur de la ligne droite joignant le pied de l'arbre à la première grosse branche (4);
- Les coordonnées géographiques (longitude et latitude) de chaque parcelle et de chaque arbre;
- Relevé des pressions de chaque parcelle (pâturage, incendies...).

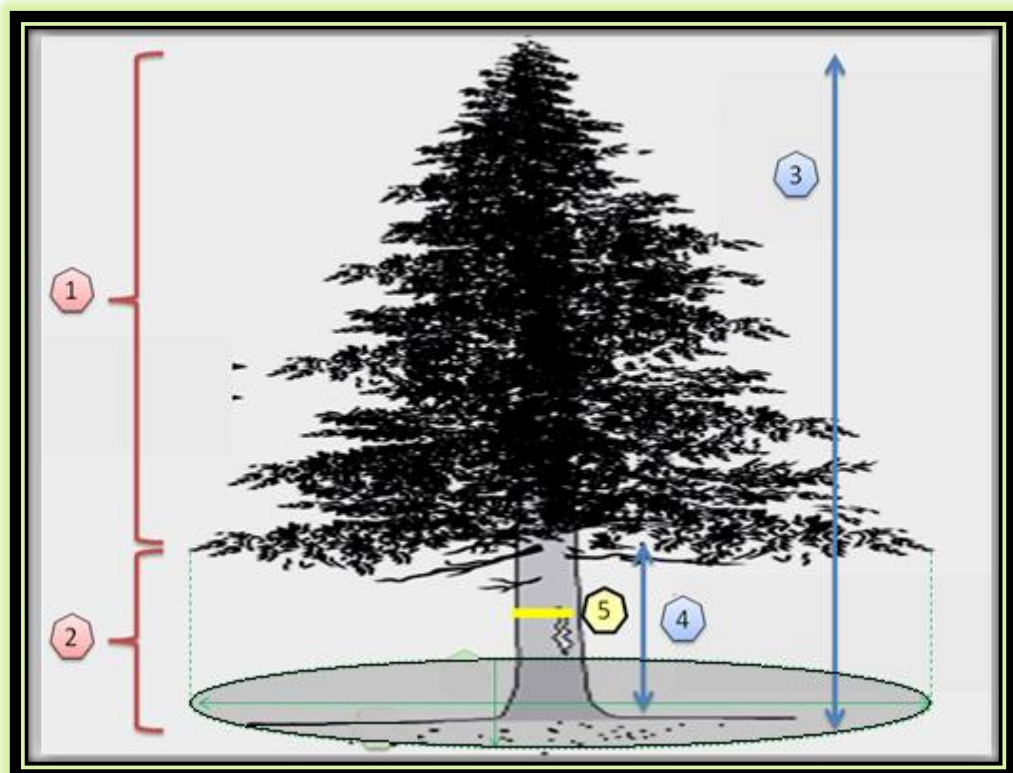


Figure 27. Paramètres dendrométriques mesurés sur terrain: houppier (1); tronc (2)

Les outils utilisés pour réaliser nos objectifs sont (Annexe 1) :

- GPS ;
- Cordage pour délimiter un carré d'échantillonnage de 400m² ;
- Compas forestier pour la mesure du diamètre à 1.30m ;
- Relascope de Biterlish pour la mesure de la hauteur totale ;
- Les mesures sont consignées sur des fiches

1.2. Traitement et analyse des données

Après la collecte des données, les informations et les données recueillies durant les travaux de terrain (mesure dendrométrique, coordonnées GPS,...etc) sont recopiées sur le tableur Excel afin de faciliter leur traitement.

❖ Le facteur d'élancement ou la stabilité

L'élancement ou la stabilité d'un peuplement est donnée par la valeur du coefficient d'élancement (CE) et qui le rapport hauteur-diamètre (Robisoa et al. 2008).

Le facteur d'élancement c'est la hauteur totale (Ht) de l'arbre sur le diamètre à 1,30m (D), dans la même unité :

$$\text{CE} = \text{H/D}$$

Ou

$$\text{CE} = (\text{H/D}) \times 100 \text{ (H en m, D en cm)}$$

CE < 100 : Peuplement régulier et stable avec un couvert complet et dense

CE > 100 : Peuplement régulier est instable

❖ Le potentiel exploitable

Le potentiel exploitable des peuplements peut être affecté à la qualité. Le seuil d'exploitabilité est le diamètre strictement supérieur à 40cm. Ainsi, plus les peuplements sont riches en individus de gros diamètre, plus ils sont à fort potentiel, et plus leur qualité est meilleure (Robisoa et al. 2008).

❖ **La densité**

L'abondance d'une espèce est la quantité relative au nombre d'individus d'une espèce donnée par unité de surface ou de volume par rapport à leur nombre total.

L'abondance des arbres est donnée par le nombre de tiges par hectare (Robisoa et al. 2008) :

$$N = (n * 10000) / S$$

N : est le nombre de tiges inventoriées ;

S : est la superficie en hectare

❖ **La surface terrière**

La surface terrière est révélée par la surface terrière G en m²/ha et est calculée par la formule :

$$G = \sum gi = \sum \pi d^2 / 4$$

gi : surface terrière de chaque individu en m²

d : diamètre de l'arbre en mètre.

❖ **La contenance (volume)**

Le volume du peuplement qui s'exprime en m³ par hectare et donné par la formule de Dawkins (1958) :

$$V = \sum vi = \sum [gi * hi]$$

gi: surface terrière de l'arbre

hi : hauteur bois fort de l'arbre

❖ **Le taux de mortalité**

Le taux de mortalité (Tm) est le rapport entre le nombre annuel des arbres morts et le nombre des arbres vivants sur cette année d'un territoire donné (Robisoa et al. 2008). Il est calculé par la formule suivante :

$$Tm (\%) = (m/M) * 100$$

m : nombre d'arbres morts ou chablis,

M : nombre total des arbres.

❖ **Le taux de régénération**

La régénération est le rapport entre le nombre d'individus régénéré (n) et le nombre d'individu total (N). Elle peut être axée sur la catégorie des jeunes bois qui dans cette étude rassemble les petites tiges dont le diamètre est compris entre 1cm et 10cm.

L'avenir du peuplement forestier est estimé à partir du taux de régénération (TR) (Rollet, 1969) dont la formule est :

$$\text{Tr (\%)} = (n/N)*100$$

❖ **Analyse des pressions et menaces**

Le suivie des pressions est très importante en matière de suivi écologique. Pour la région de Djebel Ouahch, il s'agissait de repérer les diverses formes de pression (incendie, exploitation illicite, érosion, pâturage, maladies, chablis,etc).

1.3. Sylviculture et production en cônes et pignes

La fructification du pin pignon commence à un âge compris entre 15 et 20 ans et atteint son maximum vers 40 ans.

❖ **Echantillonnage**

Nous avons été amenés à faire la collecte des cônes âgés de 2 et 3 ans, facilement reconnaissables par leur taille et leur couleur. L'avantage de considérer ces cônes non mûrs réside dans le fait qu'ils ne soient pas encore récoltés et qu'ils permettent de refléter la production fructifère de manière plus fiable (nombre de cônes/arbre) alors que pour les cônes de 3 ans notre choix a été orienté vers les arbres les moins accessibles qui gardent encore la majorité de leurs cônes.

Les cônes sont récoltés manuellement au niveau de chaque arbre dans les différentes stations étudiée, comptés et séparés suivant leur état sanitaire.

Pour les cônes de 3ème année, trois catégories sont choisis (petites, moyen et grand), et transportés au laboratoire.



Photo 15. Cône de pin pignon (2015)

Nous avons réalisé des mesures sur leur longueur, largeur et leur poids (Photo 16, b). Les cônes ont été par la suite trempés dans l'eau chaude et enfin séchés à l'étuve pendant 24 heures à une température de 60°C (photo 16, a) afin de les éclater et compter par la suite les graines et les peser (photo 16, c).

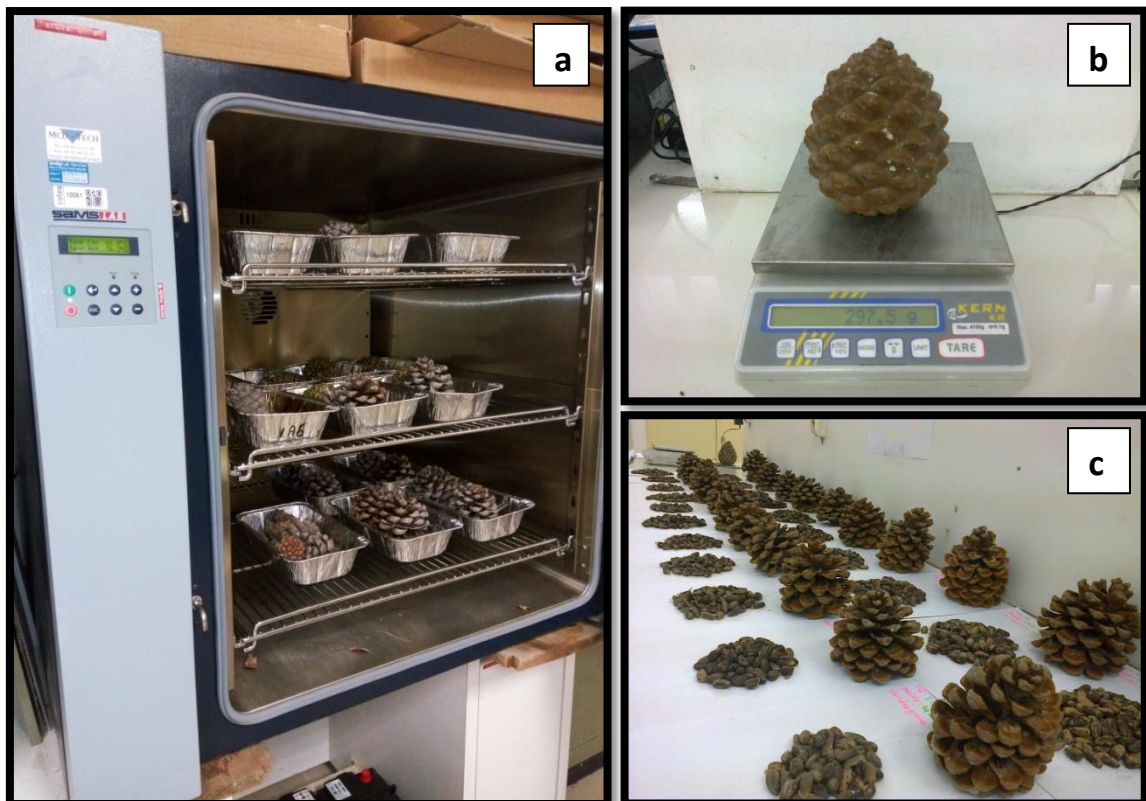


Photo 16. a: séchage des cônes, b: poids des cônes, c: extraction des graines (2015)

2. Etude pédologique

Notre choix a porté sur les stations les plus représentatives possibles de la forêt, en tenant compte bien sûr du facteur sécurité, ce qui nous a poussé à choisir les stations les plus proches de la route principale, donc certains facteurs ont été négligés à savoir : l'exposition, l'altitude, la pente, ...etc.

Le travail a été divisé en deux parties :

- ❖ Etude de terrains : réalisation de profil pédologique
- ❖ Travail de laboratoire : analyses physico-chimiques

2.1. Réalisation de profil pédologique

Toute étude approfondie de sol commence par une étude spatiale du terrain dirigée par un pédologue ou un agro-pédologue qui va localiser les sites des fosses pédologique et la détermination des horizons.

Les horizons se différencient les uns des autres par leur couleur, texture, structure, la teneur et la nature de la matière organique. Il est parfois difficile de déceler les différentes limites entre les horizons car ces derniers peuvent être nets ou diffuses, rectilignes ou sinueuses.

Les outils utilisés pour réaliser nos objectifs sont :

- Pelle, pelle-pioche voire pioche : pour creuser un nouveau profil
- Mètre pliant de couleur claire ou ruban de couturière: pour évaluer l'épaisseur du profil et des différents horizons
- Petit matériel : truelle, spatule(s), couteaux (couteau de cuisine à dent et couteau à pain), sécateur
- Flacon de HCl : pour déterminer si les horizons sont carbonatés
- Un carnet de terrain avec crayons
- Sacs de congélation en plastique PE et système de fermeture
- Feutres indélébiles
- Etiquettes (Annexe 2) et stylo à bille ou crayon gras

❖ Echantillonnage

- L'identification de la station (lieu-dit, coordonnées)
- Le relief et la topographie (altitude, exposition, pente, microtopographie)

- Le type de végétation
- Le type de roche-mère (substratum géologique, superposition éventuelle de plusieurs roches...)
- La date du prélèvement
- La profondeur du profil dépend de l'épaisseur du sol
- Nous avons bien nettoyé la fosse et on laisse sécher durant quelques heures.
- A l'aide de couteau, nous avons nettoyé soigneusement du haut vers le bas. Les horizons doivent apparaître clairement identifiés par leur couleur, leur structure, la présence de tel ou tel autre caractère
- Délimité les horizons à l'aide d'une trace au couteau
- Nous avons prélevé l'échantillon de terre sur toute la largeur de l'horizon
- Nous avons pris les échantillons du bas vers le haut du profil, pour éviter des contaminations dues aux horizons supérieurs.
- Chaque échantillon doit peser environ 3kg à l'état sec
- Nous avons ensachés les échantillons et rempli l'étiquette
- Nous avons rempli la fiche d'échantillonnage pour l'envoi au laboratoire
- Les échantillons obtenus sont dits échantillons de sol frais

2.2. Analyses physico-chimiques du sol

Les caractéristiques physicochimiques ont porté sur les propriétés suivantes : La granulométrie <Texture> : argile (A), limon (L) et sable (S), Densité apparent D(a), Porosité, Matière organique (MO), Calcaire total, la conductivité électrique (CE), Capacité d'échange cationique (CEC), pH_{eau} et pH_{KCl}, Azote totale.

❖ Analyse granulométrique (texture)

L'analyse granulométrique consiste à séparer la partie minérale du sol en fractions selon les dimensions des particules et à déterminer en poids les proportions relatives de ces fractions.

La détermination des différentes fractions granulométriques est faite selon la norme AFNOR NF X 31- 107 (2003).

La fraction totale des sables est séparée par tamisage du contenu du flacon suivi par un séchage pour ainsi obtenir les différentes fractions du sable total (grossier et fin), tandis que

les limons et les argiles sont séparés par sédimentation selon la méthode de la pipette Robinson (dans des conditions bien déterminées de température et de temps).

Tableau 16. Grille d'appréciation des unités granulométriques du sol (Duchaufour, 1991)

Classer granulométriquement	Dimension (µm)
Argile	< 2
Limon fin	2 - 20
Limon grossier	20 - 50
Sable fin	50 - 200
Sable grossier	200 - 2000

Les trois fractions ainsi déterminées permettent, avec l'utilisation du triangle textural Américain système USDA (SSDS, 1993).

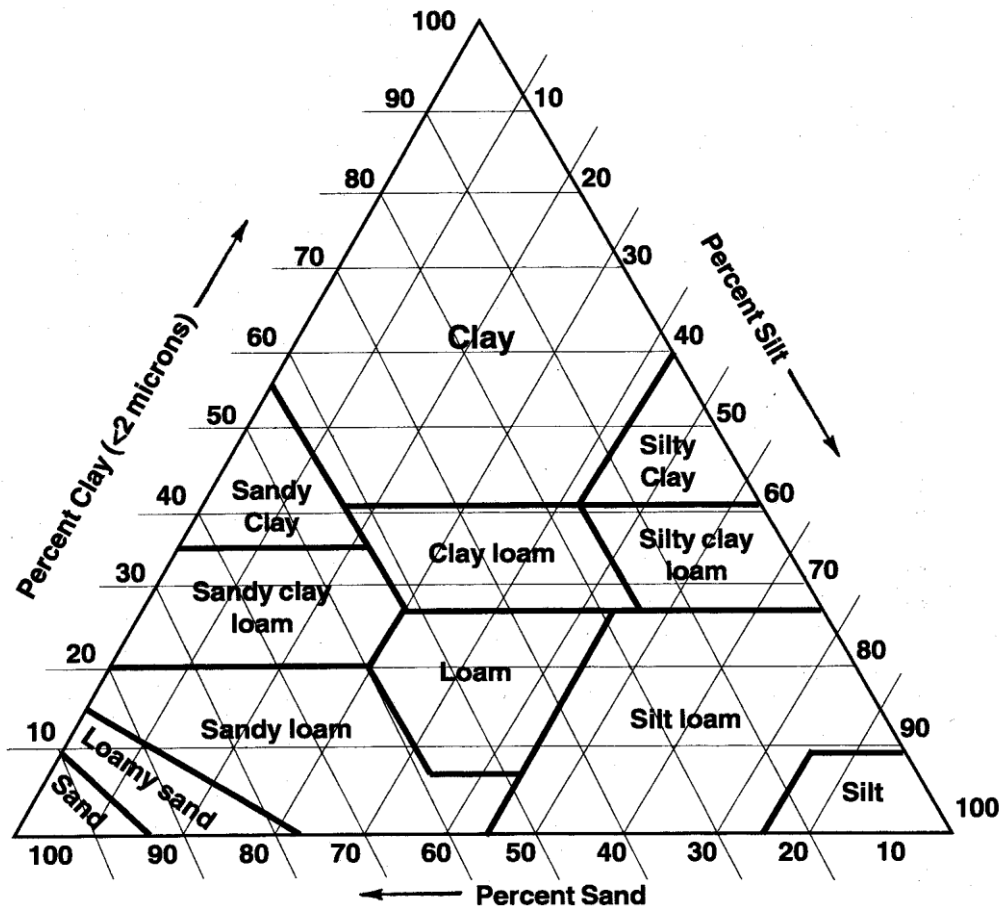


Figure 28. Triangle textural Américain système USDA (SSDS, 1993)

❖ **Densité apparent d(a)**

La détermination de la densité apparente est réalisée selon la norme ISO – 11272 (ISO., 1998). Les résultats sont exprimés en g.cm⁻³.

❖ **Matière organique (MO)**

Le dosage de la matière organique est réalisé à partir du dosage de l'un de ses constituants : le carbone organique. Le carbone organique (CO) est estimé à 58% de la matière organique (MO) d'où :

$$\% \text{ MO} = \% \text{ CO} \times 1.724$$

La méthode de détermination du carbone organique est basée sur l'oxydation de ce dernier par le bichromate de potassium (K₂Cr₂O₇) en milieu acide sulfurique selon la méthode de Walkley et Black (Duchaufour, 1991).

Tableau 17. Grille d'appréciation de Matière organique dans sol (Hazleton et Murphy, 2007)

MO (%)	Classe
< 0.4	Extrêmement faible
0.4 – 0.6	Très faible
0.6 - 1	Faible
1 – 1.8	Modéré
1.8 - 3	Elevé
>3	Très élevée

❖ **Azote total**

La teneur en azote total est déterminée selon la méthode Kjeldahl décrite par la norme ISO – 11261 (ISO., 1995b).

L'azote du sol est minéralisé sous forme de NH₄⁺ grâce à l'aide sulfurique concentré (H₂SO₄). Le NH₄⁺ est transformé en NH₃ est ensuite déplacé par distillation et piégé dans une solution d'acide borique (HBO₃) où il est titré à l'aide de H₂SO₄ 1N.

Le résultat est exprimé en %, la grille d'appréciation de ce taux représente dans le tableau (18). La prise d'essai est de 1g de sol tamisé à 2mm.

Tableau 18. Grille d’appréciation de la teneur en azote (SSDS, 1993)

Azote total (%)	Classe
< 0.1	Faiblement riche en azote
0.1 – 0.2	Moyennement riche en azote
0.2 – 0.3	Riche en azote
>0.3	Très riche en azote

❖ **Rapport (C/N)**

Le rapport calculé à partir des taux de carbone organique et d’azote, les valeurs du rapport C/N renseignent sur l’état biologique du sol. En évaluant l’évolution de la matière organique (Tab 19). En effet, lorsque la MO est décomposé, il y a perte de carbone sous forme de CO₂ et l’azote se combine à l’humus.

Tableau 19. Grille d’appréciation du rapport (LCA):Laboratoire de conseils et d’analyse, 2008)

Classe	C/N (%)	Evolution de la MO
Très faible	< 6	Décomposition de la MO
Faible	6 -9	
Normal	9 – 11	Bonne décomposition de la MO
Légèrement élevé	11- 12	Décomposition lente de la MO
Elevé	12 – 14	
Très élevé	>14	

❖ **Calcaire total**

Il est déterminé avec le « calcimètre de Bernard » selon la norme ISO – 10693 (ISO, 1995a), en dosant les carbonates de calcium CaCO₃ par l’acide chlorhydrique HCL, on considère que le calcaire total présente la quasi-totalité des carbonates.



La teneur en calcaire total est exprimée en (%) et appréciée selon la grille du tableau 20. la prise d’essai est de tamisé à 2mm.

Tableau 20. Grille d’appréciation de calcaire total du sol (Proposées par GEPPA in Baize, 1988)

Calcaire total (%)	Classe
<1%	Non calcaire
1 – 5%	Peu calcaire
5 – 25%	Modérément calcaire
25 – 50%	Fortement calcaire
50 – 80%	Très fortement calcaire
>80%	Excessivement calcaire

❖ **Conductivité électrique (CE)**

La conductivité électrique d'une solution du sol est un indice des teneurs en sels solubles dans se sol, elle exprime approximativement la concentration des solutés ionisables présents dans l'échantillon c'est-à-dire son degré de salinité. Elle a été déterminé par la méthode ISO – 11265 (ISO, 1994).

Les mesures ont été réalisé à l'aide d'un conductimètre en plongeant l'électrode dans le surnageant. Les résultats sont exprimée en (dS/m⁻¹) et apprécies en classes de salinité (Tab 21).

Tableau 21. Grille d'appréciation de la salinité des sols en fonction de la CE (SSDS, 1993)

CE (dS.m ⁻¹)	Classe
0 - 2	Non salin
2 - 4	Salinité très faible
4 - 8	Salinité faible
8 -16	Salinité modérée
>16	Salinité élevée

❖ **Capacité d'échange cationique (CEC)**

La CEC représente la capacité maximale de cations échangeables qu'un sol peut retenir à un pH donnée. Elle est déterminée par la méthode spectrophotométrique NF X 31 – 130 (AFNOR, 1999) qui consiste à saturer le sol avec une solution de chlorure de cobaltihexamine (utilisé comme ion échangeur).

Après saturation, l'excès est dosé par un spectrophotomètre UV à une longueur d'onde de 475 nm. La CEC est exprimée en cmol+.kg⁻¹ et appréciée selon la grille du tableau 22. La prise d'essai est de 2.5g de sol tamisé à 2mm.

Tableau 22. Grille d'appréciation de la capacité d'échange cationique (Baize, 2000)

CEC (cmol+.kg ⁻¹)	Classe
< 5	Très faible
5 - 10	Faible
10 - 20	Moyenne
20 -30	Elevée
>30	Très élevée

❖ **pHeau**

La détermination des valeurs du pH des sols est donnée selon la norme AFNOR., 1998. Il dépend de la concentration en ions $[H_3O^+]$ de la solution : $pH = -\log [H_3O^+]$. Le pH est mesuré à l'aide d'un pH mètre. L'appréciation des valeurs mesurées du pH est réalisée selon le tableau 23. La prise d'essai est de 10g de sol tamisé à 2mm.

Tableau 23. Grille d'évaluation des valeurs du pH du sol (SSDS :Soil Survey Division Staff, 1993)

pH eau	Classe
< 5	Fortement acide
5 – 6	Acide
6 – 6.6	Légèrement acide
6.6 – 7.4	Neutre
7.4 – 7.8	Légèrement alcalin
>7.8	Alcalin

❖ **pH kcl**

Le pH kcl correspond à la concentration en hydrogène $[H^+]$ du sol obtenu après ajout de KCl. Le KCL a pour effet de chasser les H^+ fixés sur le Complexe Argilo-Humique, ce qui permet de déterminer l'acidité totale ou acidité de réserve du sol.

3. Etude morphologique

3.1. Teneur en eau

La teneur en eau des graines fraîches est déterminée pour 20 graines de Pin pignon par passage de l'échantillon à l'étuve à 105°C pendant 24h. La teneur en eau est exprimée en % par rapport au poids frais, elle est calculée par la formule suivante (Heller, 1989) :

$$H\% = \frac{PF - PS}{P} \cdot 100$$

3.2. Techniques de culture et germination

Notre étude est réalisée sur des semis de pin pignon (*Pinus pinea L.*) issus des pignes récoltés sur des sujets adultes de la région de Djebel Ouahch à Constantine à la fin du mois de novembre 2014. Le site de prélèvement est situé à une altitude de 1100 m.

Au laboratoire, les graines sont trempées pendant quelques minutes dans l'eau pour éliminer les graines en mauvais état ou parasités. Elles sont séchées à l'air libre pendant

48 heures. Ils sont mis à germer dans la tourbe (matière organique 2%, matière sèche 3%, rétention en eau 30%, pH=6.5) saturée d'eau à une température ambiante de 16°C et à l'obscurité.

Les tests de germination portent sur des différents traitements :

T1 : Graines imbibées dans l'eau pendant 48h

T2 : Graines fraîches

T3 : Graines sans coque

T4 : Graines sans coque et sans téguments

Les résultats sont exprimés sous forme de pourcentage de faculté germinative (FG%) capables d'évoluer en plantules normales. Elle est calculée comme suit (Sherafaw et Baker, 1996) :

$$\mathbf{F.G} = \frac{\mathbf{Ng} \times 100}{\mathbf{N.mg}}$$

F.G : Faculté germinative (%)

Ng : Nombre de grains germés

N.mg : Nombre de graines mises à germer

3.3. Paramètres de morphologies

En milieu naturel, l'élevage des semis est conduit dans des sachets polyéthylènes des différentes dimensions : Diamètres (D), Longueurs (L) et Volumes (V)

- **D1**= 6cm, **L1**= 12cm, **V1**= 339cm³
- **D2** = 9cm, **L2** = 18cm, **V2**= 1144cm³
- **D3**= 19cm, **L3**= 24 cm, **V3**= 6801cm³
- **D4** = 28cm, **L4**= 32cm, **V4**= 20924cm³

Exposés aux conditions naturelles dans la région de Djebel Ouahch. Ils sont arrosés régulièrement deux fois par semaine. Tout au long d'une année, nous avons réalisé des mesures saisonnières sur les semis.

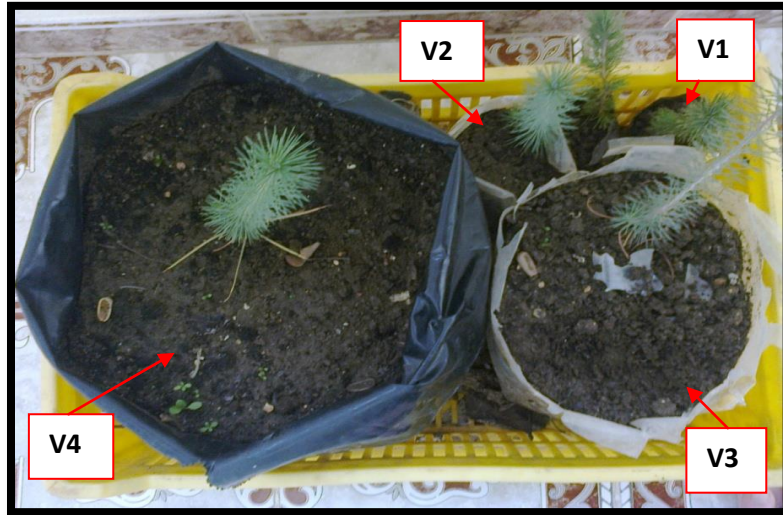


Photo 17. Semis de pin pignon après une année de culture en milieu naturel (2015)

La longueur des tiges et des racines a été mesurée à l'aide d'une règle graduée. Les valeurs données sont les moyennes de trois répétitions par saison.

La partie aérienne est séparée du système racinaire à l'aide d'une lame au niveau du collet. On pèse son poids frais à l'aide d'une balance de précision. La matière sèche des deux parties est déterminée après passage à l'étuve réglée à 80°C pendant 48h. Une fois les échantillons complètement secs, leur poids sec est déterminé à l'aide d'une balance de précision.

4. Traitements thermiques et hydriques

4.1. Stress thermique

Le matériel végétal utilisé est constitué de semis de pin pignon, âgés d'une année, fournis par la pépinière de Djebel Ouahch, Constantine. Les plants sont élevés dans les conditions naturelles, placés dans des sachets en plastique contenant de sol issu de cette pépinière (Photo 18).



Photo 18. Semis de pin pignon (2014)

Les semis de Pin pignon sont transférés à des températures comprises entre -10°C et 50°C (-10°C , -6°C , -2°C , 2°C , 38°C , 44°C et 50°C) durant une période de 3 heures (stress thermique).

Après chaque stress les analyses biochimiques (sucres solubles, proline et protéines solubles totales) ont été réalisées au niveau des différents organes des semis de pin pignon (aiguilles, tiges et racines), et les analyses biochimiques de la chlorophylle, MDA et les enzymes (catalase et peroxydase) ont été réalisés au niveau des aiguilles des semis.

4.2. Stress hydrique

Pour le stress hydrique, les semis sont transportés au laboratoire repiqués dans des pots en plastique remplis de terre végétale. Les pots sont placés en conditions semi-contrôlées, dans une chambre de culture à température (24°C le jour, 10°C la nuit) et lumière (2160 Lux) (Photo 19).



Photo 19. Chambre de culture : Semis de pin pignon

Le stress hydrique est appliqué par l'arrêt de l'irrigation jusqu'à l'obtention des différents niveaux de stress (75%, 55% et 35%). Les semis sont arrosés une fois jusqu'à la capacité aux champs (100%). Les niveaux hydriques sont déterminés régulièrement à l'aide d'une sonde hydro thermique. Les niveaux retenus sont : **Témoin** (100%), **N1** (75%), **N2** (55%), **N3** (35%) (Photo 20).

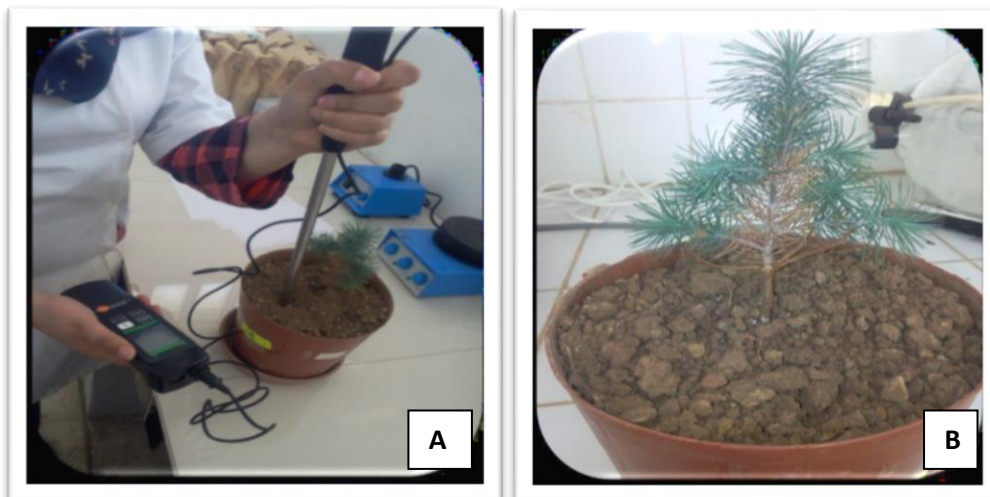


Photo 20. A : Thermo hygromètre à sonde métallique, B : Semis de pin pignon stressé au niveau N3= 35%

4.3. Stress combiné

Les semis de Pin pignon sont ensuite soumis à un stress thermique aux températures suivantes 38°C, 44°C et 50°C durant une période de 3 heures.

4.4. Méthodes de dosage des paramètres biochimiques

Après chaque stress les analyses biochimiques (sucres solubles, proline et chlorophylle) sont réalisées au niveau des différents organes (aiguilles, tiges et racines).

- ❖ **Dosage de la chlorophylle** : La méthode de Mac Kiney (1941) et Arnon (1949)
- ❖ **Dosage des sucres solubles** : La méthode au phénol de Dubois et al. (1956)
- ❖ **Dosage de la proline** : La méthode suivie est celle de Trolls et Lindsley, (1955)
- ❖ **Dosage des protéines** : La méthode de Bradford (1976).
- ❖ **Dosage de l'activité de la catalase** : Le protocole décrit par Aebi (1984).
- ❖ **Dosage de l'activité peroxydase** : La méthode de Chance et Maehly (1955)
- ❖ **Dosage du malonedialdéhyde (MDA)**: La méthode de Kramer et al. (1991) (Annexe 7).

5. Etude phénologique et croissance

La phénologie du pin pignon a été étudiée en relation avec le climat et la variabilité interannuelle dans une forêt naturelle dans la région de Provence-Alpes-Côte d'Azur en France et dans la région de Djebel Ouahch à Constantine.

Les objectifs principaux de cette étude est de définir les différentes phases de croissance et de développement de ce Pin d'une part, et d'autre part comprendre les relations entre le climat et cette phénologie, afin de mieux prédire les effets potentiels du changement climatique.

5.1. Arbres-échantillons

Pour les études phénologiques, nous avons choisi des arbres sains. Les données ont été relevées sur 6 arbres, à raison de 2 à 5 branches par arbre en fonction de leur accessibilité.

Les branches ont été choisies en nombre égal dans les trois parties du houppier des arbres (Photo 21):

- Le haut (**H**)
- Le milieu (**M**)
- Le bas (**B**)



Photo 21. Prélèvement des échantillons arbres et branches de pin pignon (Provence-Alpes-Côte d'Azur - France, 2016)

- Sur chaque branche, 5 rameaux ont mesurés (Photo 22) :
- L'axe principal de la branche (**P**)
- Deux paires de rameaux secondaires âgées d'environ 15 et 20 ans ; Pour chaque paire
 - Un axe fort (rameau fort) (**F**)
 - Un axe faible (rameau faible) (**W**)

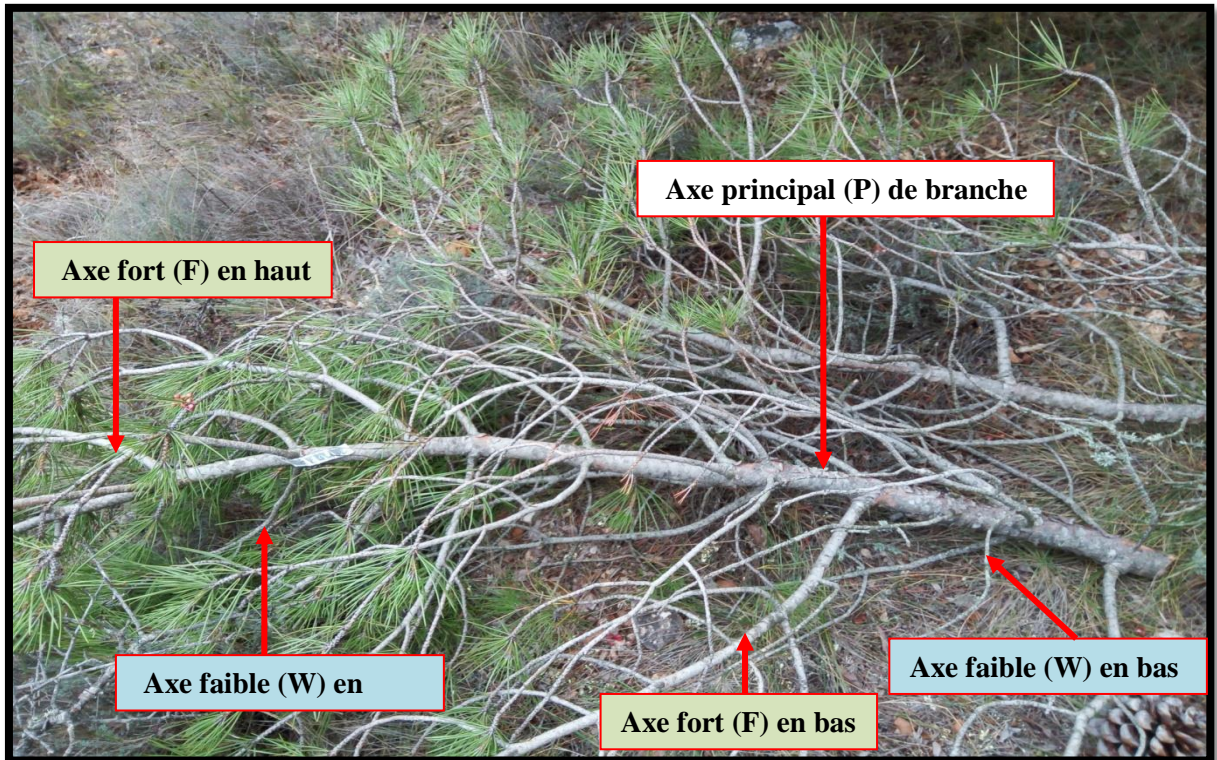


Photo 22. Les axes dans les branches de Pin pignon Provence-Alpes-Côte d'Azur - France, 2016)

Au laboratoire, on mesure (Photo 23):

- La longueur des pousses (**LP**)
- La longueur des fleurs mâles (**LF**)
- La longueur des aiguilles (**LA**)

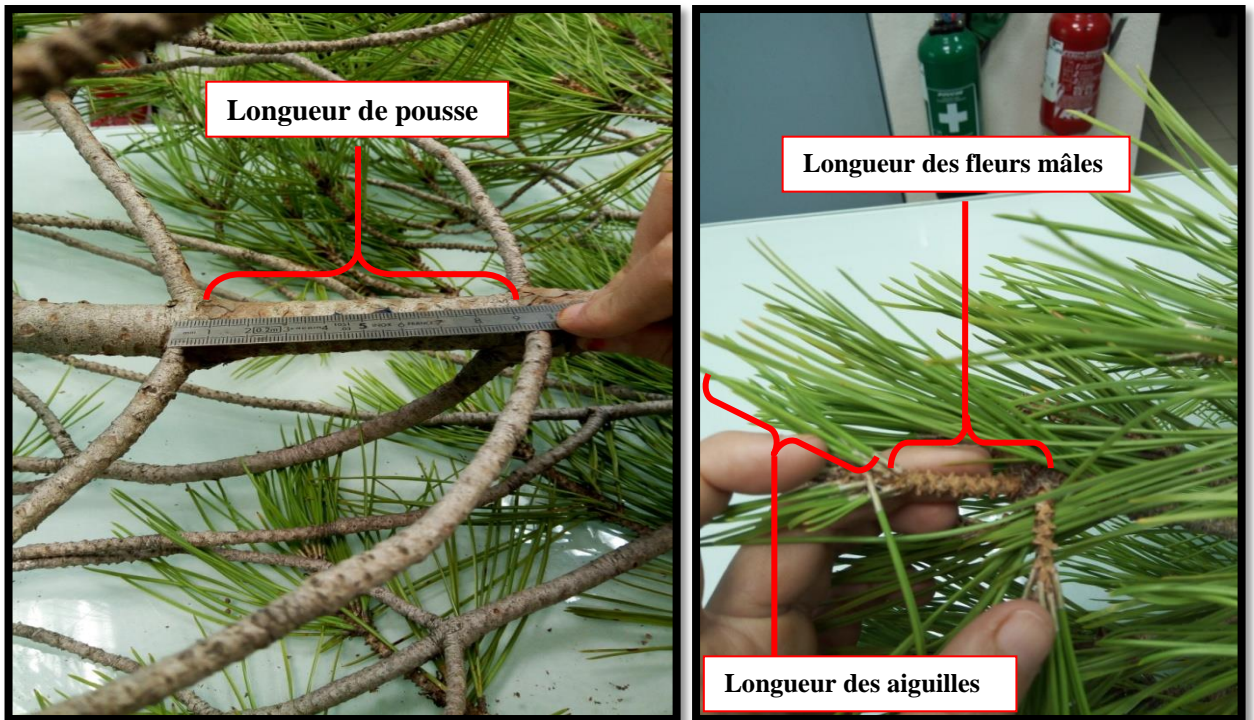


Photo 23. Mesures sur les branches de Pin pignon (Irstea – Centre d’Aix –en- Provence, 2016)



Photo 24. Agrandir les branches faibles pour les mesures (Irstea – Centre d’Aix –en- Provence, 2016)

Pour la productivité on détermine (Photo 25) :

- Le nombre des cônes (**NC**)
- Le nombre des futures branches (rameaux) (**NB**) ; Sur les hautes et les basses branches, et les fortes et les faibles branches.

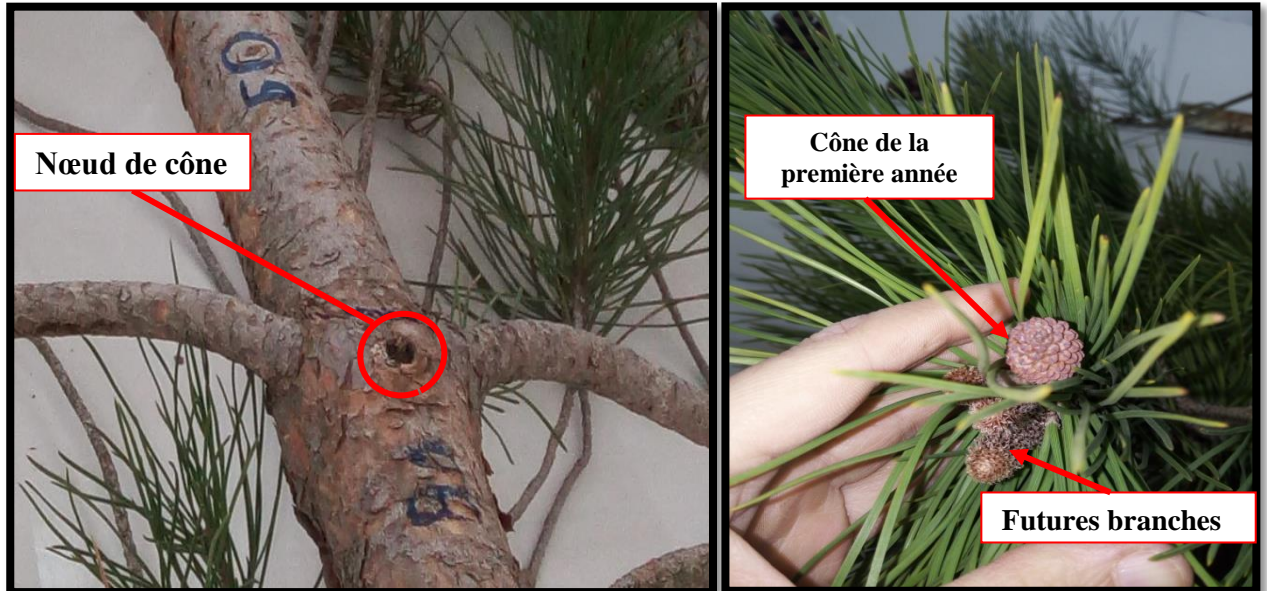


Photo 25. Productivité des cônes et des branches de pin pignon (Irstea – Centre d’Aix –en-Provence, 2016)

L’approche méthodologique suivie dans cette étude, consiste à réaliser des mesures de croissance sur des peuplements de Pin pignon au niveau du massif de Djebel El Ouahch-Constantine (Station de Kef lekhel) et d’analyser et comparer les résultats.



Photo 26. Mesures sur les branches de pin pignon (Constantine, 2016)

6. Etude statistique

Les résultats, présents sous forme de courbes ou d'histogrammes, rejoignent le plus souvent des valeurs moyennes encadrées par leur écart-type, ces derniers ont été réalisés par le logiciel Excel.

L'analyse de la variance a été appliquée à toutes les variables étudiées. Des différences significatives entre les différents traitements pour chaque paramètre mesuré ont été testées grâce au test de Newman-Keuls calculé au seuil de 5 %. Le logiciel utilisé est Excel STAT (2015).

Pour déterminer la dépendance et la proportionnalité inter variables, le degré de coefficient de signification des corrélations (r) est calculé au seuil de 5 % ($P = 0,05$). Les corrélations existantes entre les paramètres phénologique et les différentes années sont mises en évidence par l'analyse en composantes principales (ACP) dont le principe est de représenter un phénomène multidimensionnel par un graphique à deux ou plusieurs dimensions, puis à une classification ascendante hiérarchique (CAH).

1. Caractéristiques dendrométriques des placettes-échantillons de pin pignon

La structure horizontale d'une espèce rassemble la répartition de tiges et la surface terrière par classe de diamètre. Le tableau suivant récapitule les principales caractéristiques des peuplements de pin pignon qui existent dans les stations visées.

Tableau 24. Caractéristique quantitatives des peuplements

Paramètres Stations	Densité N/ha	D _{1.30} (cm)	Ht (m)	H/D	HBF (m)	Dominance G (m ² /ha)	Volume (m ³ /ha)
Matlegue	45	30.45	6.87	22.69	2.68	3.28	7.35
Draa nagah	34	32.16	7.28	23.29	2.68	2.84	8.00
Kef lekhel	16	32.35	7.20	22.79	2.82	1.33	3.89
El haddage	20	38.15	7.71	20.68	3.23	2.20	7.44
El bier	24	33.69	7.50	31.25	2.97	2.03	6.53
Tassenga	26	33.69	7.15	21.54	2.69	2.41	6.72
Ben yakoub	43	28.5	11.38	40.14	4.25	3.20	35.69
El hambli	78	29.87	10.43	35.38	3.56	5.16	19.74

Le tableau 24 montre que le diamètre moyen minimum obtenu est de 28.5cm pour la station de Ben yakoub. Pour les peuplements des stations El hambli, Matlegue, Draa nagah, Kef lekhel et El bier, celui ci est compris entre 29.87 et 33.69cm, ces peuplements présentent des caractéristiques plus développées au stade de haut perchis et jeune futaie. Le diamètre moyen maximum observé est de 38.15cm, pour la station El haddage, il correspond au stade de la futaie adulte avec des diamètres plus au moins importants.

1.1. Relations entre les différents paramètres mesurés

1.1.1. Densité et surface terrière des peuplements

Avec un diamètre moyen compris entre 28.5 cm et 38.15 cm, on observe deux groupes :

Le premier groupe renferme les stations d'El hambli, Matlegue et Ben yakoub, qui sont successivement représentées un très grand nombre de tiges variant de 34 à 78 pieds/ha dans la classe $[20 \leq D_{1.30} \leq 30\text{cm}]$ [et le stade de développement haut perchis.

Le deuxième groupe regroupe les stations de Kef lekhal, El haddage, Tassenga, El bier et Draa nagah représentées surtout par la classe $[30 \leq D_{1.30} \leq 45\text{cm}]$, ce qui prouve que ces peuplements sont au stade de développement la jeune futaie.

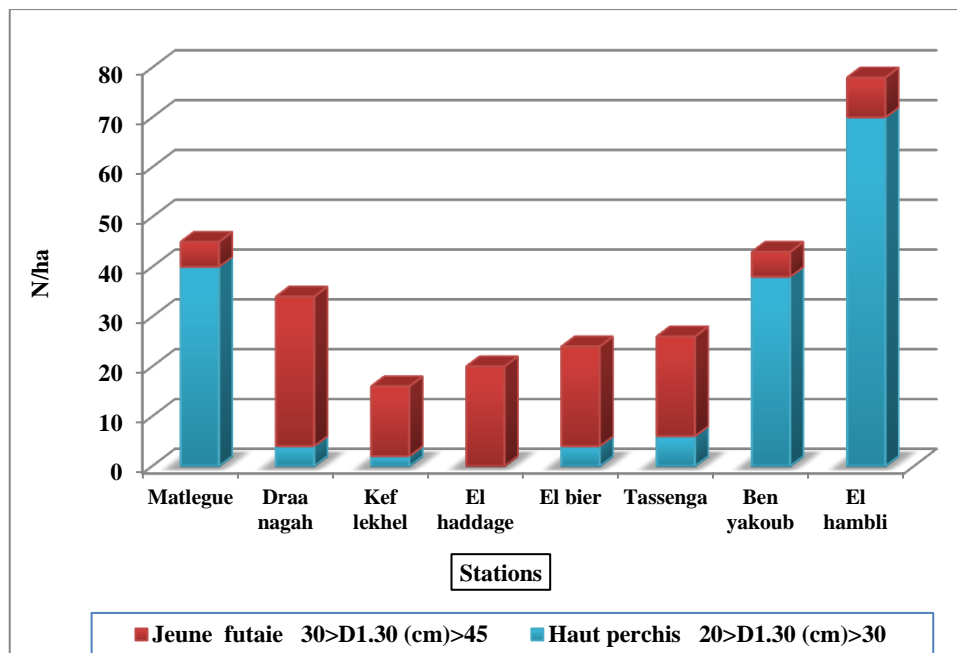


Figure 29. La densité par classe de diamètre et stade de développement

La figure 30 montre que la surface terrière des peuplements de pin pignon varie dans le même sens que la densité. Elle est variée entre 1.33 m² /ha (Kef lekhel) à 5.16 m² /ha (El hambli). La valeur de la surface terrière élevée pour le haut perchis est due à une densité plus élevée.

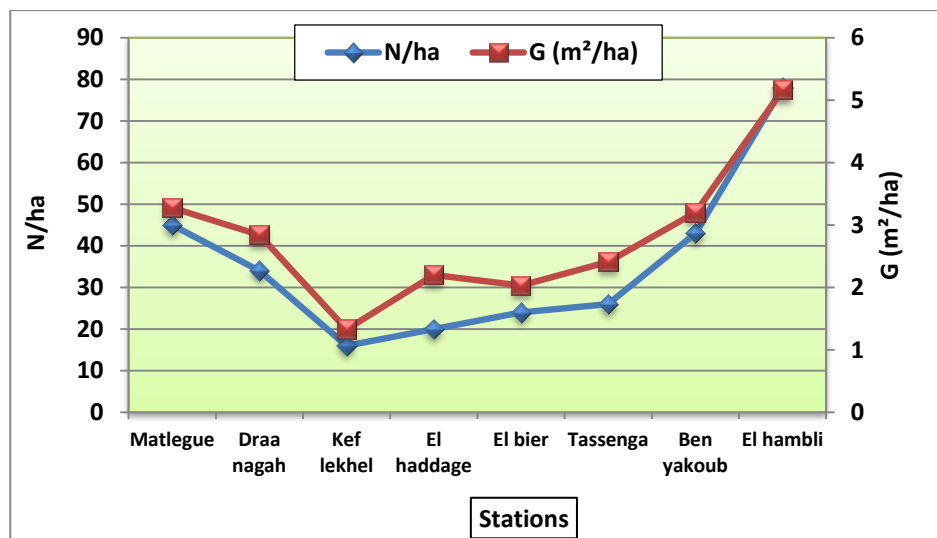


Figure 30. La surface terrière en fonction de diamètre

1.1.2. Coefficient d'élanement ou la stabilité

Toutes les stations étudiées ont un coefficient de l'élanement inférieur à 100, cela signifie qu'une bonne stabilité du peuplement.

La station d'El hambli et Ben yakoub représentent le coefficient d'élanement le plus élevé (35.38 et 40.14), cela permet de dire que ces peuplements sont moins stable que les précédents.

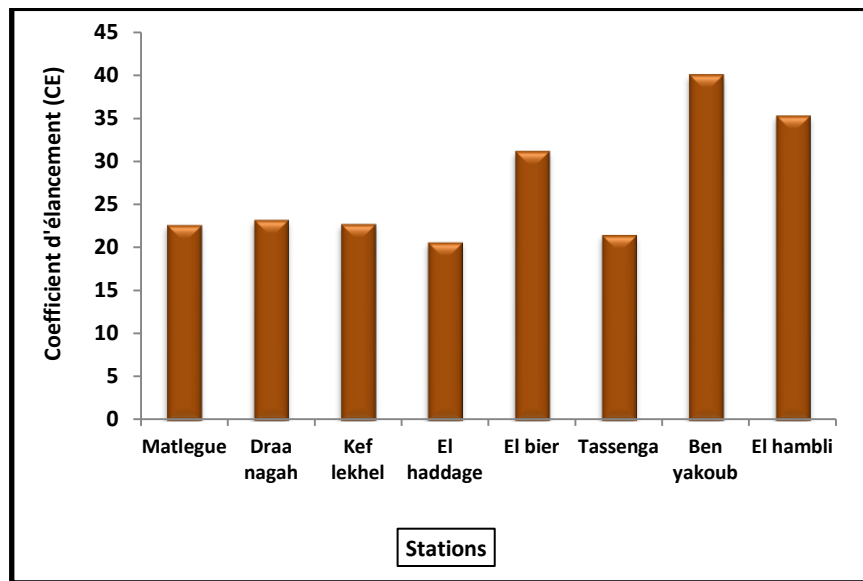


Figure 31. Coefficient d'élanement (H/D) par station

La figure 32 montre que le coefficient de détermination $R^2 = 0.745$, cela signifie que 74.5% des valeurs observées de la hauteur sont expliquées par la courbe de tendance. Nous pouvons alors utiliser cette courbe pour la prévision de la hauteur moyenne d'un peuplement de régénération naturelle livré à lui-même si le diamètre moyen est connu (Andriamahazo, 2003).

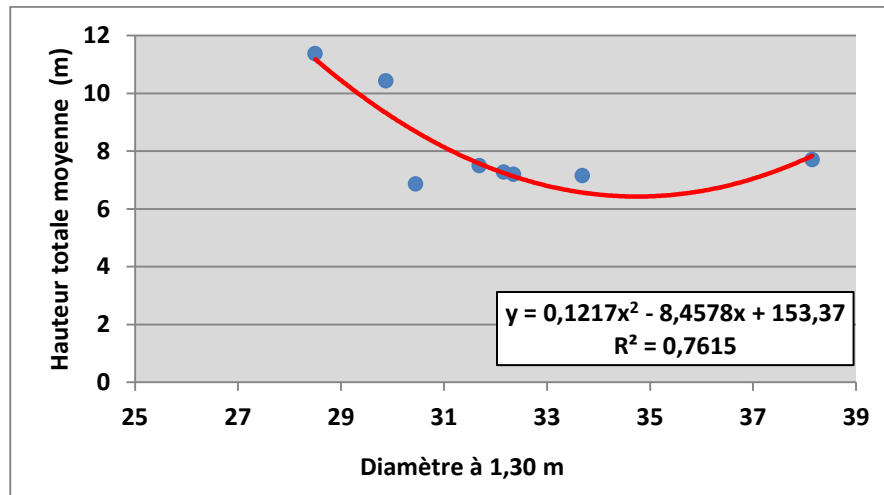


Figure 32. Hauteur totale moyenne en fonction du diamètre à 1.30m des peuplements de pin pignon

1.1.3. Contenance (volume)

Le volume, comme le montrent déjà certains paramètres calculés avant, est un critère dendrométrique particulièrement important pour caractériser un peuplement.

Le volume est calculé à partir du diamètre D1.30 (cm) et la hauteur de bois fort donnée pour chaque station. Les stations les plus productives en bois sont Ben yakoub et El hambli.

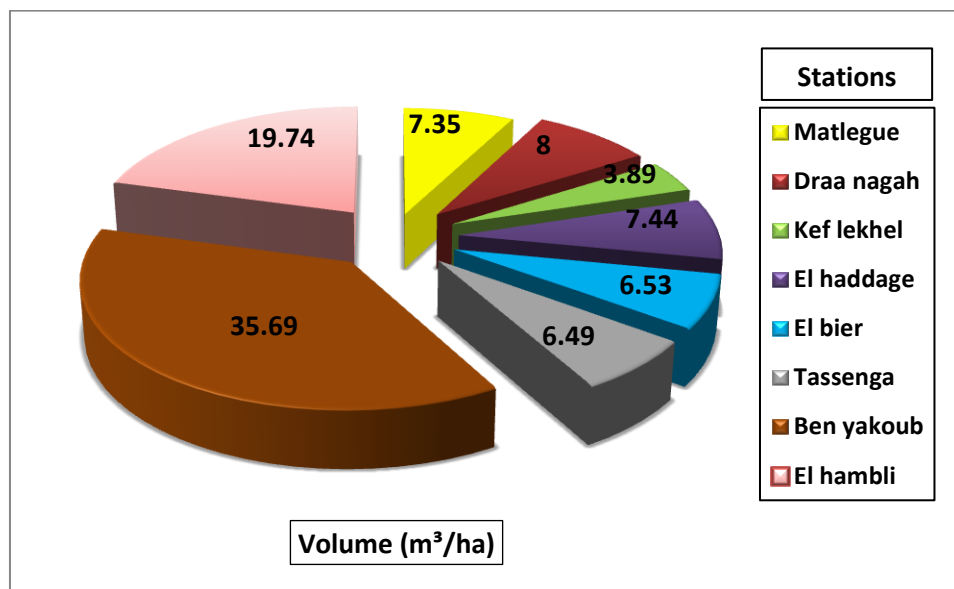


Figure 33. Volume de bois des peuplements de pin pignon

1.1.4. Potentiel exploitable

Le tableau 25 montre que les stations d'El haddage, El bier et Tassenga avec 20, 24 et 26 pieds/ha ont des diamètres supérieures à 40 cm, c'est la catégorie de gros bois.

Tableau 25. Catégories de diamètre

Stations	Classes de diamètre (cm)					
	D 1,30cm< 26cm	26cm< D1.30 cm ≤35cm			D1.30 cm > 38cm	
	Petits bois	Bois moyens			Gros bois	
Matlegue	0	27.77	30.25	34.15	0	0
Draa nagah	0	27.48	30.9	33.75	35.29	0
Kef lekhel	0	28.53	30.25	33.91	36	0
El haddage	0	0	0	33.8	0	42.5
El bier	0	28.7	30.29	34.19	36.26	41.5
Tassenga	0	27.75	32	35	0	40
Ben yakoub	0	27	30	0	0	0
El hambli	25.75	27.4	30.4	34	0	0

1.1.5. Taux de mortalité

Les résultats de tableau 26 montrent que la mortalité des peuplements de Pin pignon est inférieur à 5.81% pour les différentes stations.

Les stations les plus sains sont : El bier et Tassenga.

Tableau 26. Taux de mortalité dans les stations étudiés

Station	Taux de mortalité (%)
Matlegue	2.75
Draa nagah	3.12
Kef lekhel	2.52
El haddage	3.63
El bier	0
Tassenga	0
Ben yakoub	5.81
El hambli	3.71

1.1.6. Taux de régénération

Le taux de régénération du pin pignon est faible, il est inférieur à 11% pour toutes les placettes ; l'âge des semis varie entre 1 et 5 ans (Tab 27).

Tableau 27. Taux de mortalité dans les stations étudiés

Station	N/ha	Taux de régénération (%)
Matlegue	45	7.75
Draa nagah	34	10.34
Kef lekhel	16	8
El haddage	20	5.5
El bier	24	9.21
Tassenga	26	0
Ben yakoub	43	0
El hambli	78	11.25



Photo 27. Régénération naturelle de pin pignon

1.1.7. Analyse des pressions et des menaces

Les pressions les plus observées sont les incendies et les coupes illicites des peuplements (Tab 28).

Tableau 28. Degré de pressions

Station	Incendies	Coupes illicites	Maladies	Mortalité
Matlegue	+++	++	++	+
Draa nagah	+++	+++	++	+
Kef lekhel	+++	+++	++	+
El haddage	+++	-	+	+
El bier	+++	-	+	-
Tassenga	+++	-	+	-
Ben yakoub	+++	++	++	++
El hambli	+++	++	+	+
+++	Forts menaces		+	Faibles menaces
++	Pressions et menaces Moyennes		-	Aucune Pression et menace



Photo 28. Coupes illicites des peuplements de pin pignon (Draa nagah)



Photo 29. Chablis et les morts sur pieds des peuplements de pin pignon (Matlegue)



Photo 30. Pathologie du feuillage (Champignons de *Sphaeropsis sapinea*)



Photo 31. Incendie des peuplements de pin pignon

1.1.8. Analyse en composantes principales (ACP) et hiérarchique (CAH)

L'analyse en composantes principales (ACP) a été appliquée à la matrice des corrélations obtenues à partir des différentes variables centrées réduites, mesurées sur les différentes stations étudiées.

Une forte corrélation est observée entre la plus part des paramètres mesurées ; Ainsi, une corrélation négative entre la densité et le diamètre moyen ($D_{1.30\text{ m}}$) ($r = -0.602$), ce dernier

est négativement corrélé avec la hauteur totale (Annexe 3, Carte 1). Une corrélation positive entre la hauteur totale et la densité avec le volume bois forts ($r= 0.952$), ($r= 0.541$) respectivement (Annexe 3, Carte 2, 3).

Tableau 29. Matrice de corrélations

Variables	N/ha	D (cm)	H (m)	H/D	HBF (m)	G (m ² /ha)	V (m ³ /ha)	Tm (%)	Tr (%)
N/ha	1	-0,602	0,636	0,584	0,432	0,985	0,541	0,412	0,288
D (cm)	-0,602	1	-0,538	-0,720	-0,384	-0,501	-0,597	0,279	-0,069
H (m)	0,636	-0,538	1	0,902	0,955	0,623	0,952	0,694	-0,216
H/D	0,584	-0,720	0,902	1	0,849	0,534	0,869	0,457	-0,081
HBF (m)	0,432	-0,384	0,955	0,849	1	0,430	0,936	0,724	-0,333
G (m ² /ha)	0,985	-0,501	0,623	0,534	0,430	1	0,538	0,417	0,233
V (m ³ /ha)	0,541	-0,597	0,952	0,869	0,936	0,538	1	0,731	-0,381
Tm (%)	0,412	0,279	0,694	0,457	0,724	0,417	0,731	1	-0,079
Tr (%)	0,288	-0,069	-0,216	-0,081	-0,333	0,233	-0,381	-0,079	1

Les pourcentages de variation expliqués par chacun des sept axes retenus, ainsi que les pourcentages cumulés. On voit bien que le premier axe explique à lui seul 61.59% de la variation totale des variables initiales, le deuxième axe 19.16% et le troisième axe explique quant à lui 8.67%. Les trois premiers axes expliquent ensemble de 89.40%. Donc ces trois axes synthétiques résument au mieux l'information apportée par les variables initiales (Tab 30).

Tableau 30. Résultats de l'ACP des sept axes à partir des 09 caractéristiques mesurées sur les 08 stations de la région de Djebel Ouahch

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
Valeur propre	5,544	1,725	0,781	0,547	0,369	0,021	0,013
Variabilité (%)	61,598	19,166	8,676	6,081	4,100	0,238	0,142
% cumulé	61,598	80,764	89,440	95,521	99,620	99,858	100,000

F1: 1^{er} axe principale ; F2: 2^{ème} axe principale ; F3: 3^{ème} axe principale ; F4: 4^{ème} axe principale ; F5: 5^{ème} axe principale ; F6: 6^{ème} axe principale ; F7: 7^{ème} axe principale

La figure 34 montre d'une part, des valeurs propres en fonction des rangs des axes principaux, et d'autre part, le graphique du pourcentage cumulé de la variation expliquée en fonction des axes principaux.

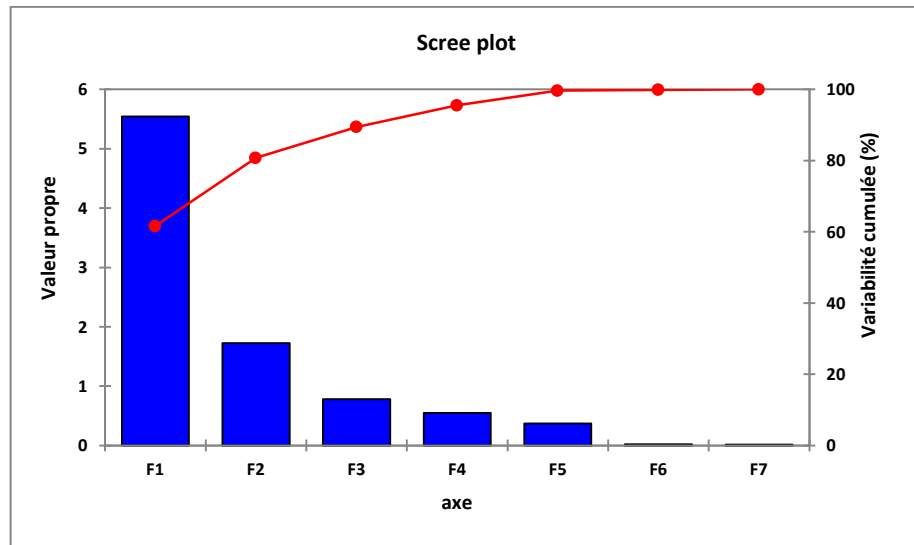


Figure 34. Histogramme des valeurs propres en fonction des rangs des axes principaux pour l'ensemble des stations

L'interprétation de ces composantes nécessite le calcul des corrélations entre chacune des composantes principales retenues avec chacune des différentes variables initiales.

Si on examine les résultats du tableau 30, on constate que le premier axe qui contient à lui seul 61,59% de l'information apportée par l'ensemble des variables initiales regroupant les paramètres suivants : N/ha, D, H, H/D, HBF, G, V et Tm, puisque la proportion de la variance prise en considération par l'axe 1 pour chacune de ces 8 variables initiales est d'une façon générale supérieure à 50%. L'axe 2 contient 19,16% de l'information est caractérisé le taux de régénération (Tr).

Tableau 31. Valeurs des corrélations et corrélations carrées des variables initiales avec les deux premières composantes principales

Variabiles	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
N/ha	0,571	0,350	0,004	0,072	0,000	0,002	0,001
D (cm)	0,464	0,078	0,314	0,031	0,113	0,001	0,000
H (m)	0,935	0,026	0,002	0,000	0,024	0,007	0,005
H/D	0,819	0,002	0,084	0,037	0,056	0,002	0,000
HBF (m)	0,791	0,143	0,015	0,008	0,038	0,000	0,005
G (m ² /ha)	0,538	0,304	0,021	0,134	0,000	0,003	0,000
V (m ³ /ha)	0,903	0,086	0,001	0,000	0,003	0,006	0,002
Tm (%)	0,509	0,034	0,298	0,047	0,113	0,000	0,000
Tr (%)	0,015	0,703	0,041	0,219	0,022	0,000	0,000

La représentation graphique des 9 variables à l'intérieur du cercle de corrélation sur le plan factoriel 1-2 montre dans la figure 35. Ces cercles de corrélations permettent de donner une interprétation physique à certaines composantes principales.

L'axe 1 est représenté par les paramètres N/ha, G, H/D, H, Tm, V et HBF qui sont corrélés positivement, dans la mesure où ces derniers présentent les plus fortes contributions. À l'opposé de cet axe, la plus faible contribution est représentée par les paramètres Tr et D.

L'axe 2 est représenté par les paramètres Tr, G et N/ha ayant des contributions plus élevées. Sur le côté négatif de ce même axe, la hauteur totale moyenne (H), HBF et le volume (V) sont caractérisées respectivement par les plus faibles contributions.

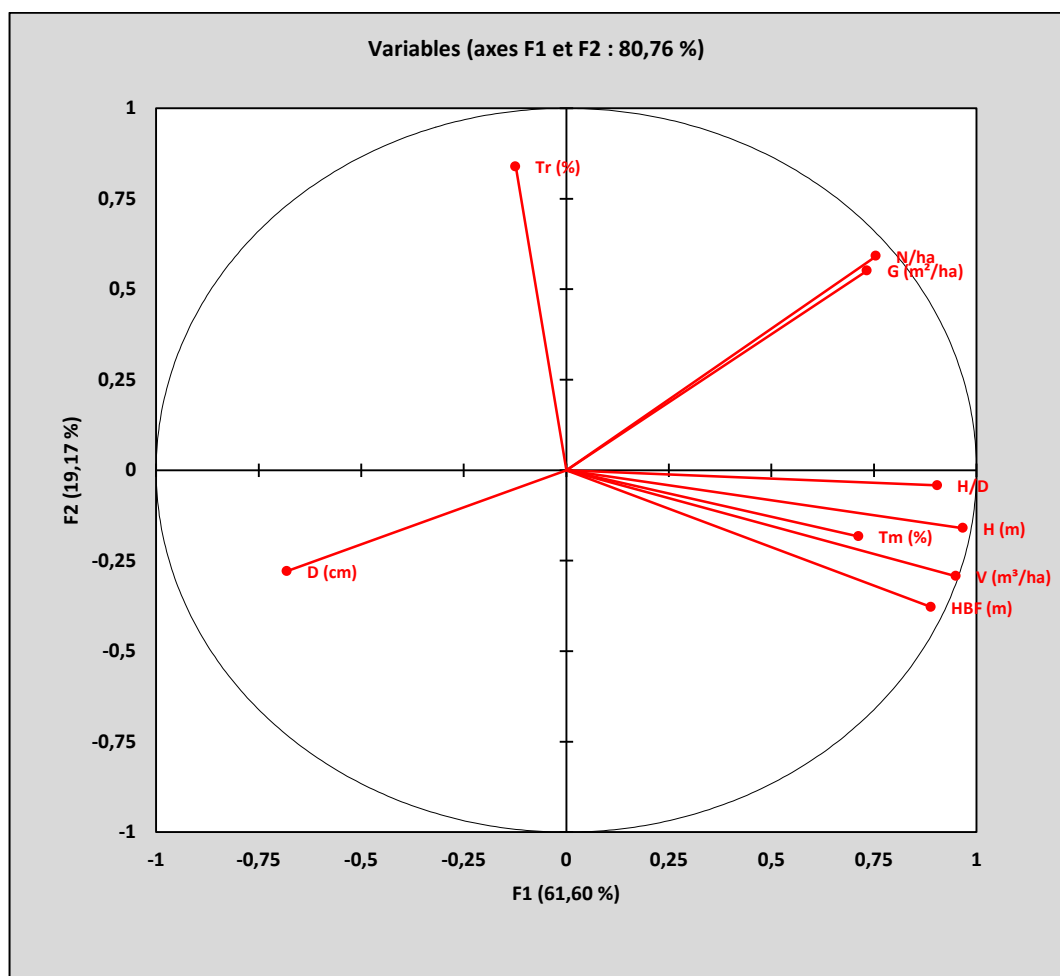


Figure 35. Représentation graphique des 9 variables à l'intérieur du cercle de corrélations du plan factoriel 1-2

L'affinité des différents paramètres étudiés est confirmée par l'analyse en composantes principales (ACP). En effet, trois groupes homogènes sont dégagés par l'ACP, le premier groupe (G1) situé sur le côté positif de l'axe 1 du cercle des corrélations présentant des affinités étroites des paramètres dendrométrique N/ha, G, H/D, H, HBF, V, et Tm avec la station de El hambli et la station de Ben yakoub; le deuxième groupe (G2) est situé toujours sur le même axe du cercle des corrélations présente une affinité entre le paramètre taux de régénération (Tr) et les stations (Matlegue, Draa nagah et El bier) et enfin le troisième groupe (G3) corrélé avec le diamètre (D) regroupant les stations (Kef lekhal, Tassenga et El haddage).

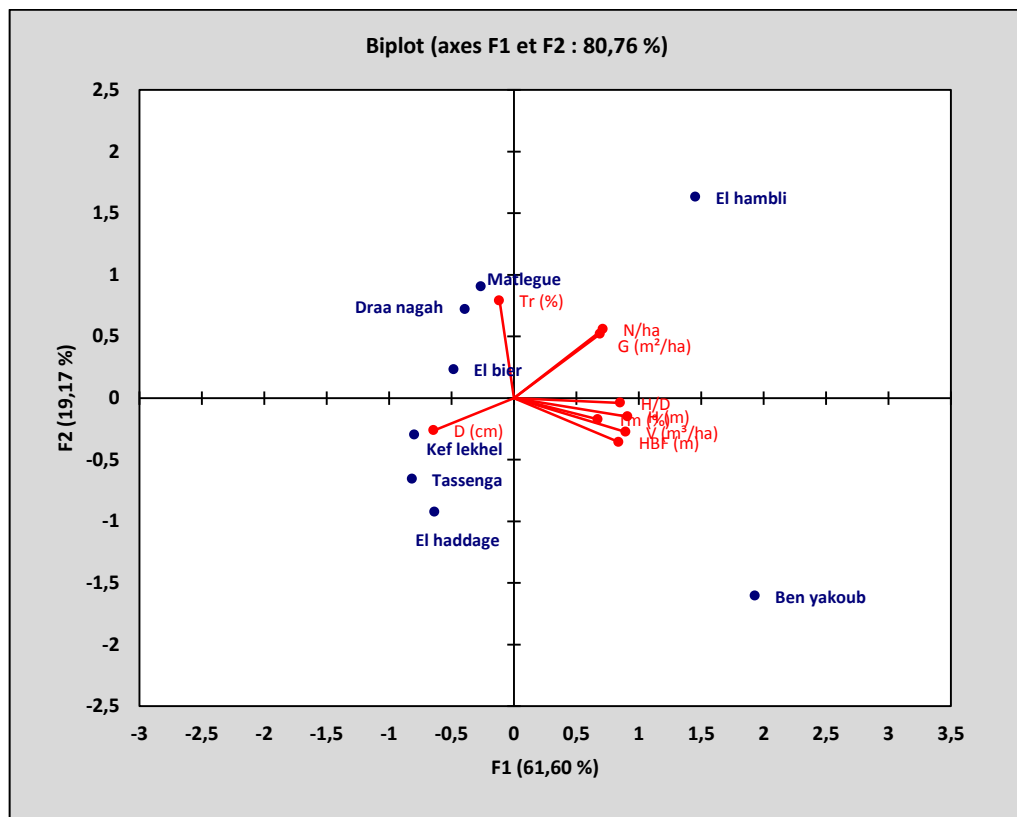


Figure 36. Représentation graphique des 9 variables et les stations étudiées dans plan factoriel 1-2

Le dendrogramme de la figure 37 donne 3 groupes différents. Le groupe 1 englobe les stations : Ben yakoub et El hambli avec le stade de développement haut perché, le groupe 2 représente les stations de Draa nagah, Kef lekhal, El haddage, El bier, Tassinga et Matlegue avec un stade d'évolution jeune futaie et quelques pieds haut perchés.

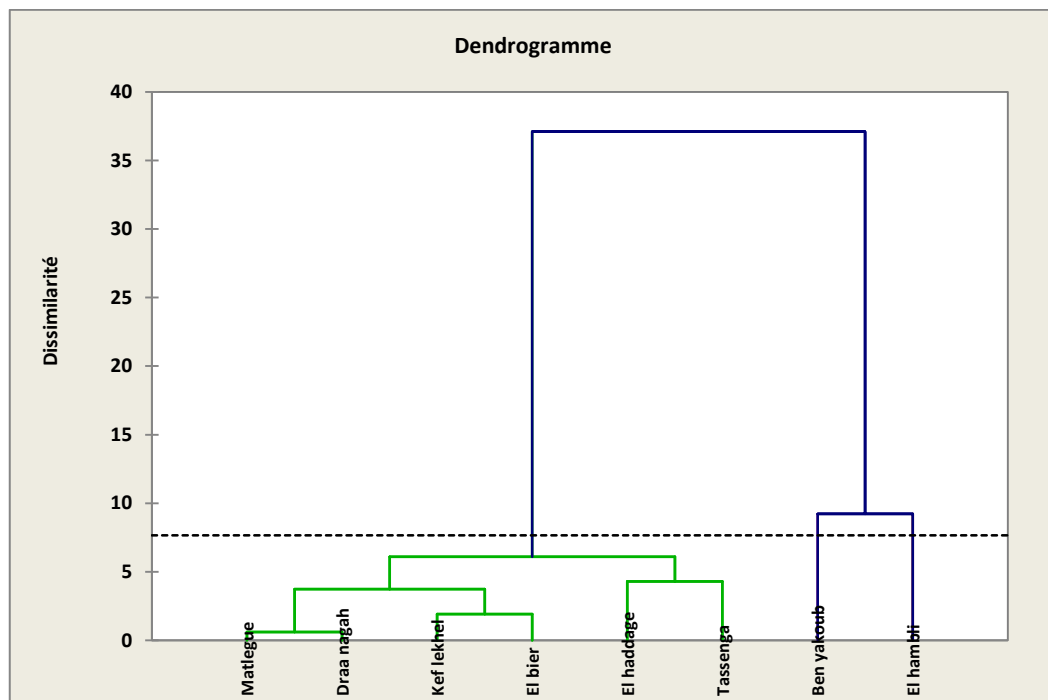


Figure 37. Dendrogramme du regroupement des stations étudiées

1.2. Production des cônes et de pignes

La production de pignes, représente le principal produit des pinèdes de pin pignon. Cependant des différents paramètres stationnelles (âge des arbres, densité, traitement sylvicoles, état sanitaire,... etc).

Le tableau suivant montre les paramètres de production des peuplements de Pin pignon dans la région de Djebel Ouahch.

Tableau 32. Paramètres de production des peuplements de pin pignon dans la forêt de Djebel Ouahch

Paramètres	Cône/arbre	Cône/Kg	Graine/cône	Graines/kg	300 graines	1kg graines	Poids de cône	Poids de graine
	30/45 cônes	2-5 cônes	45/155	300 graines	250g	1200 graines	245/550g	0.6/1.3g
Moy	38	3.5	100	/	/	/	397.5g	0.95g

Les résultats de la figure 38, montrent la production des cônes et de pignes des peuplements de pin pignon âgés de 35 à 40 ans dans la région de Djebel Ouahch. La production moyenne est comprise entre 3,808 et 523,765 tonnes de pignes en coque, pour une surface totale de 2278 ha (Fig 38, b).

La valeur maximale est observée au niveau de station d'El hambli, avec un rendement de 523,765 tonnes de pignes; alors que la valeur minimale est observée pour la station de Tassenga, El haddage et Ben yakoub avec un rendement de (4 tonnes, 12 tonnes, 11 tonnes) respectivement.

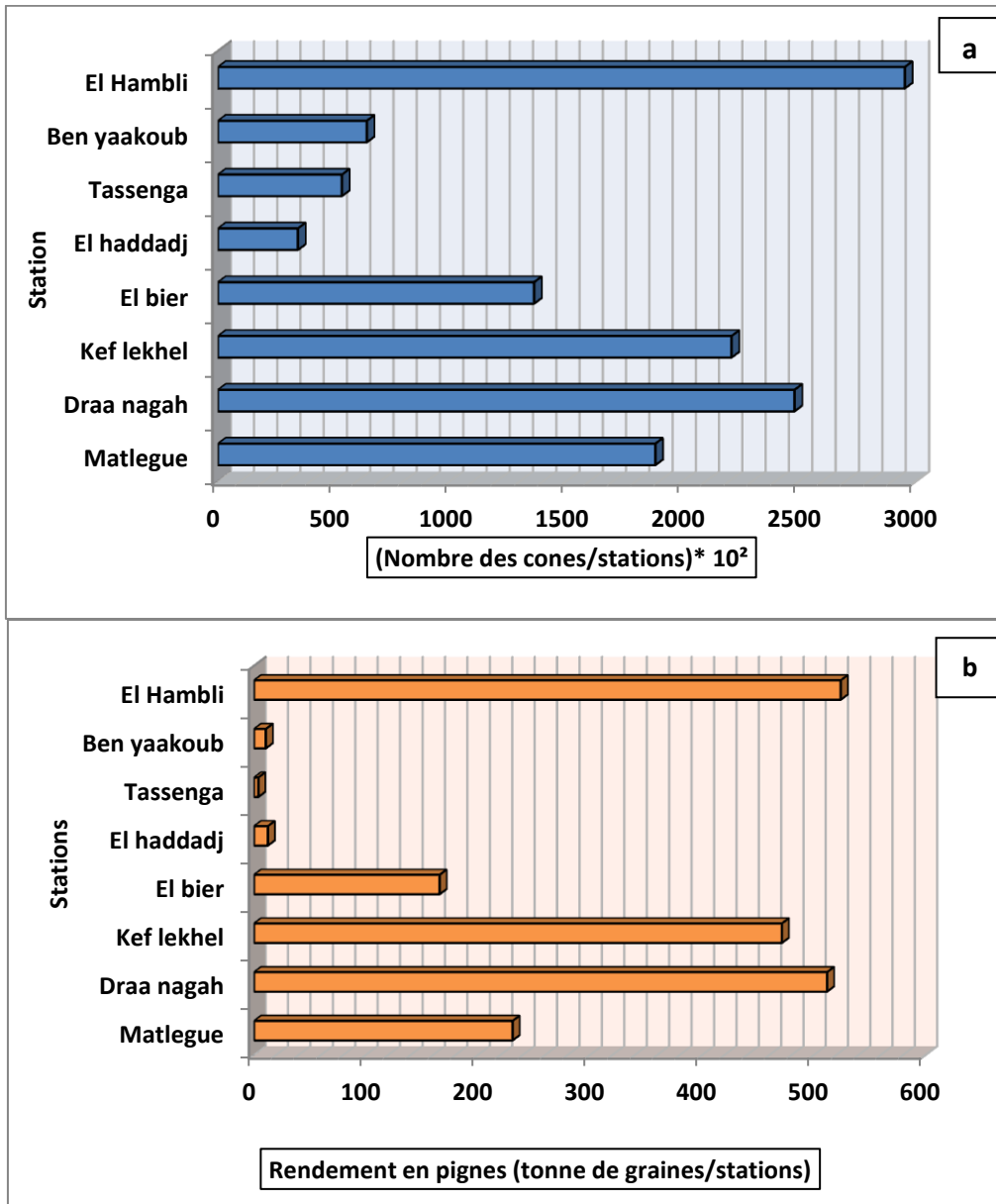


Figure 38. Production fructifère des peuplements de Pin pignon

Les figures 39 et 40 illustrent les relations entre la densité (N/ha) et la production des pignes en coque ainsi que la hauteur totale avec la production des pignes des arbres

échantillons de pin pignon dans les 8 stations: Matlegue, Draa nagah, Kef lekhal, El bier, El haddage, Tassenga, Ben yakoub et El hambli.

Les arbres de la station de Kef lekhel ont une densité plus faible par rapport aux autres et une hauteur totale moyenne (7m), avec un rendement en pignes très élevée (470.913 tonnes).

En effet, les stations de Ben yakoub et Tassenga semblent avoir la croissance la plus forte mais avec une productivité faible (3.80 et 10.52 tonnes). Cependant, ceux de El hambli gardent la croissance la plus forte avec la densité la plus élevée (78pied/ha) et un rendement très élevé en pignes (523.76 tonnes).

En général, une augmentation de la hauteur totale du houppier correspond une densité élevée des peuplements et un rendement faible en cône et pignes.

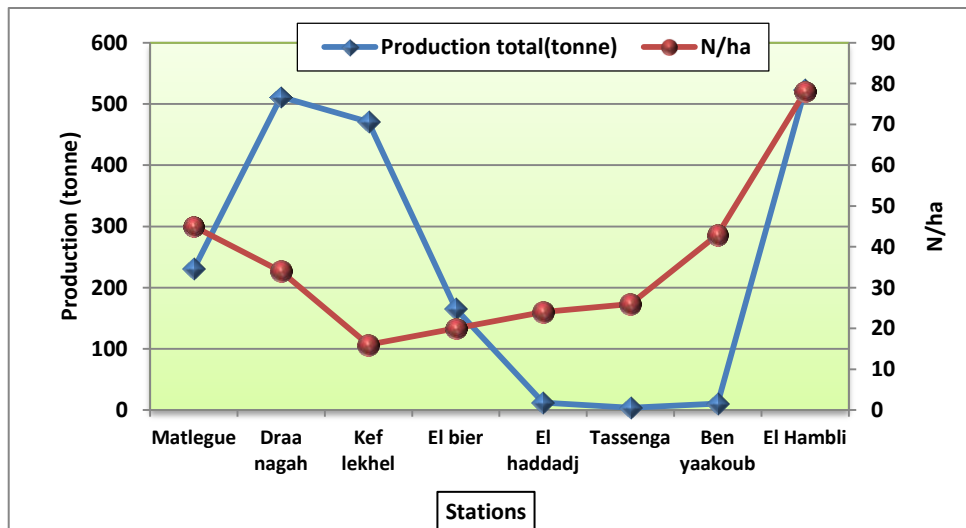


Figure 39. Relation entre la densité et la production des pignes en coque

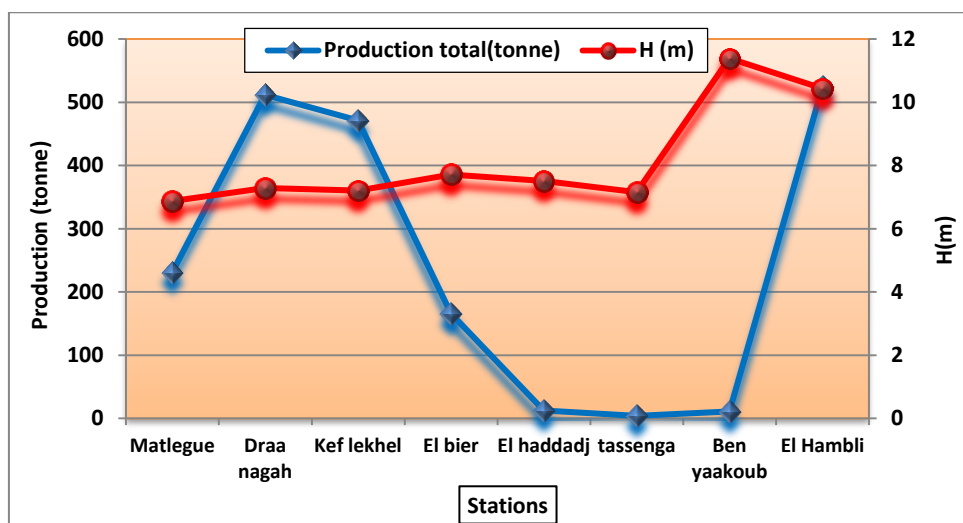


Figure 40. Relation entre production de pignes et hauteur totale

1.3. Discussion

1.3.1. Structure des peuplements de pin pignon dans la région de Djebel Ouahch

Les peuplements de pin pignon dans la région de Djebel Ouahch occupent une superficie de 2278ha, avec un âge moyen de 40 ans, caractérisé par un stade haut perchis et jeune futaie. C'est un peuplement équienne.

L'utilisation du diamètre comme critère de détermination d'état de développement a plutôt une finalité économique puisque la grosseur des arbres est liée aux assortiments de produits. A l'état de développement des jeunes futaie, la taille des arbres augmente leur valeur économique. Le principal risque est le vol de bois ou branches qui rendent le peuplement plus sensible aux perturbations climatiques comme le tempête. Les chablis sont alors fréquents dans le peuplement ayant subi de tel dommage.

Dans les différentes stations étudiées, le diamètre moyen minimum obtenu est comprise entre 28,5- 29,87cm, cela signifie que ces peuplements de pin pignon sont très denses et qu'ils n'ont pas encore atteint un bon développement. En effet, plus la densité est forte, plus la croissance en diamètre est faible et inversement pour la surface terrière et le taux de recouvrement ce qui est le cas de station de Ben yaakoub et El hambli.

Cependant, si cette densité est plus faible, la croissance en diamètre augmente alors que celle en surface terrière et en recouvrement diminue et c'est le cas de la station de Kef lekhel. Ces résultats sont en accordance avec ceux de Adili, (2012) pour l'évolution de diamètre, densité et surface terrière.

Une faible densité des individus favorise l'interception de la lumière et la croissance des arbres en diamètre comme c'est le cas des peuplements à Kef lekhel, El haddadj et El bier, alors qu'une forte densité des individus, accentue le phénomène de compétition et freine la croissance en diamètre des arbres.

Afin de comprendre la structure et la dynamique des peuplements forestiers, l'étude des relations entre certains paramètres dendrométriques tels que HBF, la hauteur ou la surface de projection du houppier (Shugart et al. 1981 cité par O'Brien et al. 1995) semble nécessaire. Les relations concernant ces paramètres pris deux à deux constituent de bons indicateurs des conditions écologiques de croissance de l'espèce (Gnangle 2005).

L'état de développement des peuplements qui détermine la surface terrières dépend de la répartition des tiges à travers les classes de diamètres (Andriamahazo, 2003).

Les relations établies dans notre étude entre l'âge des pins pignons et leur diamètre du tronc à 1.30m, d'une part, et leur hauteur totale, d'autre part, attestent que l'âge est une variable hautement prédictive de la croissance en diamètre ainsi qu'en hauteur, comme c'est souvent le cas des peuplements équiens où la croissance des arbres est assez homogène tout au long de leur vie. C'est pour cette raison qu'il a été toujours considéré comme un critère important utilisé dans l'aménagement et la sylviculture de ce type de peuplement (Chabaud et Nicolas, 2009).

Garchi et Ben Mansoura, (1999) ont confirmé également cette relation à travers un ajustement linéaire pour un peuplement de pin d'Alep à Jbel Mansour.

Nous avons également souligné une forte liaison entre la densité et le diamètre 1.30cm attestant que la première variable peut être estimée par la seconde suivant une relation de type non linéaire. Une régression de type polynomial a été enregistrée sur un peuplement de Pin maritime de la forêt de Rimel (Shaiek, 2005) et sur des chênes lièges de Kroumirie (Sebei et al. 2001). En effet plus le peuplement est âgé et moins dense et plus le développement du houppier est important et inversement.

Il est admis que la croissance et l'expansion du houppier est soumise à une compétition, de plus en plus importante suivant la densité des arbres voisins, pour l'espace et donc pour la lumière (Zhang et Chauret, 2001).

La stabilité du peuplement dépend à la fois de la densité et de l'élancement des arbres. L'étude de l'élancement des arbres vise à déterminer les facteurs de variation de sa valeur et ses relations avec la stabilité du peuplement. Cette constatation permet de supposer que le coefficient d'élancement est fonction du diamètre moyen donc de l'âge du peuplement.

L'accroissement moyen annuel du volume de bois est généralement de 3 à 4 m³/ha ; Dans des conditions écologiques très favorables, et lorsque priorité est donnée à la production de bois, (peuplements denses), on peut arriver à des accroissements de 7 à 8 m³/ha/an.

Le potentiel exploitable des peuplements est affecté par la qualité de bois. Dans cette étude, le seuil d'exploitabilité est le diamètre strictement supérieur à 30cm. Ainsi, plus les peuplements sont riches en individus de gros diamètre, plus ils sont à fort potentiel, et plus leur qualité est meilleure (Robisoa et al. 2008).

On peut dire que nos peuplements ont un moyen potentiel exploitable. Cela est dû à la moyenne de densité (nombre de tiges /ha) et aussi à l'état de leur développement en hauteur pour chercher la lumière (cas de station de el hambli et ben yakoub) ; a des sujets présentent un auteur de 11- 12 m avec des diamètres moyens de 25-26 cm.

La mortalité représente la mort naturelle des sujets, elle est plus élevée chez les jeunes tiges. Toutefois, elle est de l'ordre de 1% pour tout diamètre confondu (Robisoa et al. 2008).

Le taux de mortalité dans la station de ben yakoub est de 5.81%, avec un potentiel d'avenir faible car il y a une forte densité et concurrence entre les pieds. Pour la station de Kef lekhel et el haddage, il est plus au moins élevé car la biomasse perdue par la mortalité de certains arbres est compensée en partie par l'accroissement des diamètres des arbres encore en vie (32.35cm et 38.15 cm).

La régénération naturelle du pin pignon, pose également un problème majeur, liée au vol des cônes à cause de leur valeur économique, rendant ainsi toute possibilité de régénération même après incendie, difficile voir impossible.

En se référant à l'échelle de Rothe (1964), ce taux est inférieur à 100%, ce qui signifie que l'ensemble des peuplements de pin pignon présentent des difficultés de régénération.

La station de Tassenga et Ben yakoub se présentent des taux de régénération nuls ; Cela d'où l'incapacité de ces peuplements à régénérer convenablement, car la concurrence intraspécifique est très rude. Un peuplement ayant un taux de régénération inférieur à 5% est voué à disparaître (Ramalanjaona, 2013).

Les relations obtenues sont forcément limitées d'où la nécessité de les confirmer sur des peuplements plus âgés. Cependant notre étude servira comme une base pour aider les forestiers à établir une meilleure gestion, notamment des éclaircies, aussi en vue de l'amélioration de la croissance de ces peuplements.

1.3.2. Production des cônes et de pignes des peuplements de pin pignon

Au niveau national, les cônes ne sont récoltés que dans 50% des pinèdes, caractérisées par des clairières, des arbres improductifs, les arbres difficiles à escalader, et sur ceux qui ont peu de cônes (Catalan Bacchiller, 1989).

Afin d'avoir une idée sur le rendement actuel en cônes et en graines des peuplements de pin pignon, nous avons essayé d'estimer la production fructifère au niveau des stations étudiées.

Nos résultats ont montré que le nombre moyen de cônes de 3^{ème} et 4^{ème} année est de 154935 cônes d'où un rendement moyen en cônes de 51645 kg pour des arbres dont l'âge moyen est de 40ans.

En Tunisie, Adili (2012), montre que le nombre moyen de cônes de 3^{ème} année à Mekna III est de 1964 cônes.ha-1 d'où un rendement moyen en cônes de 426 kg.ha-1 auquel correspond un rendement en graines de 121 kg ha-1 pour des arbres dont l'âge moyen est de 35ans, cependant, le nombre moyen de cônes de 2^{ème} année ne dépasse pas les 1381 cônes.ha-1 (un rendement de 235 kg.ha-1) pour le même âge. Belkhouja (2001) a montré, dans une étude sur l'évaluation et la modélisation de la fructification du Pin pignon au nord de la Tunisie, que le nombre de cônes de 2^{ème} année dans la région de Nefza-Tabarka (âge moyen inférieur ou égal à 40 ans), est de 2703.ha-1 avec un rendement de 647 kg.ha-1.

Cependant, un rendement maximal en cônes de 84316 kg est observé dans la station d'El hambli, et un rendement minimale en cône (9825kg) dans la station d'El haddadj.

Si on compare le nombre de cônes dans notre étude (38 cônes en moyenne/arbre, âge moyen du peuplement de 40 ans) à celui de l'étude réalisée par Ganatsas et al. (2008) sur des peuplements matures de Pin pignon dont l'âge moyen dépasse les 120 ans (9,8 cônes/arbre pour un peuplement mature fermé et 62,7 cônes/arbre pour un peuplement mature ouvert), âge correspondant à la baisse de la production fructifère qui commence à partir de 80 ans, on constate que la production au niveau de notre peuplement est moyenne avec son âge (40 ans) qui correspond à la bonne période de productivité de l'espèce.

En outre, Si on compare le nombre de cônes dans notre étude celui de l'étude réalisée par Adili, (2012), montre que, en Tunisie, (5,6 cônes en moyenne/arbre de 2^{ème} année, âge moyen du peuplement de 35 ans), on constate que la production des peuplements de Pin pignon dans la région de Djebel Ouahch est élevée.

En Tunisie, dans les peuplements âgés de 20 à 50 ans, la production de pignes varie de 50 à 250 kg/ha, et la production totale est estimée à 200 tonne. Presque la moitié de cette production est utilisée par les populations locales; 10% seulement en moyenne sont consacrés à la propagation de l'espèce (Aloui, 1988). Dans notre étude, dans la région de Djebel Ouach, la production des pignes en coque est varié de 4 à 524 tonnes.

Selon Castellani, 1989, dans de bonnes conditions, la quantité de cônes récoltés varie entre 1,0 et 4,0 tonne/ha, l'équivalent de 0,2 - 0,8 tonne de pignes en coque.

La production moyenne des pinèdes portugaises en cônes/arbre par an y est comprise entre 250 et 1000-2000. Presque 95% de la production nationale de pignes sont destinés à l'exportation (Vacas De Carvalho et Pinto Berkemeier, 1991).

Pour la production des pinèdes espagnoles, la meilleure récolte a été obtenue en 1979-80, avec une moyenne provinciale de 167 kg/ha de pignes en coque. Dans la province de Badajoz, pour les récoltes de 1971-72 à 1988-89, la production moyenne par ha de pignes en coque a été de 125 kg ; les meilleures récoltes ont eu lieu en 1979-80 et en 1987-88, avec 279 et 364 kg respectivement (Catalan Bacchiller, 1989).

Généralement un accroissement moyen compris entre 0,5 et 2 m³/ha par an en France; néanmoins, la production des peuplements situés sur les sables littoraux, en milieu favorable, dépassent 10 m³ par hectare d'accroissement courant (Labadie, 1983).

En Grèce, dans des plantations de 22 et de 40 ans, l'accroissement respectivement de 5,1 et 2,2 m³/ha/an, suivant les conditions de milieu.

L'âge des arbres est considéré comme un facteur important contrôlant la fructification. Cette fructification débute à l'âge de 20 ans et augmente jusqu'à l'âge de 50 ans. Les corrélations entre les différents paramètres (volume du houppier, âge, densité..) et la production fructifère ont montré que ces variables sont explicatives, avec le volume du houppier comme facteur principal qui est à son tour dépendant de la densité du peuplement. En effet, la production fructifère évolue dans le même sens que le développement du houppier mais elle est inversement proportionnelle à la densité des arbres.

Le succès de la régénération naturelle du pin pignon demeure sous la dépendance du cycle de fructification, sa fréquence et son abondance, ce qui conditionne par la suite la disponibilité en semences au niveau du sol. Cependant, pour le Pin pignon, cette disponibilité en graines est variable d'une année à l'autre en fonction du nombre, de la taille des cônes et de la viabilité des graines en elles-mêmes (Calma et al. 2007).

L'échec de la régénération naturelle peut aussi être relié à la qualité et au pouvoir germinatif des graines. Nos résultats ont enregistré un pouvoir germinatif maximal ne dépassant pas 11,25 %.

Pour l'orientation des forêts de Pin pignon vers une meilleure production fructifère, des suggestions proposées dans les pinèdes italiennes sont les suivantes (Djaziri, 1971) :

- éclaircie entre 15 et 20 ans ; laissant 3000 pieds/ha
- éclaircie et élagages entre 20 et 25 ans ; en laissant 2000 pieds/ha
- éclaircie entre 25 et 30 ans ; laissant 1000 pieds/ha

- éclaircie et élagage entre 35 et 40 ans ; laissant 600 tiges/ha

Belkhouja (2001) propose les mêmes types de gestion pour les régions de Sedjnane et Nefza-Tabarka où l'âge moyen des peuplements n'a pas dépassé 40 ans.

2. Caractérisation physico-chimique du sol

L'exploitation des résultats des analyses pédologiques nous a permis de caractériser les paramètres physicochimiques du sol dans les quatre stations. La description des profils et les résultats obtenus sont représentées dans les tableaux suivants (Tableaux 34, 36, 38, 40).

Tableau 33. Description du Profil pédologique de la station d'El hambli

Profil N° 01. EL hambli			
Année	2015-2016		
Mois	Janvier		
Coordonnées de la station	Altitude : 876m		
	N : 36° 19' 24,262''		
	E : 6° 55' 38,605''		
Nombre des profondeurs	Trois profondeurs (horizons)		
Profondeur en (Cm)	P1	P2	P3
	0-15	15-40	40-(+89)
Couleur et caractéristiques	Marron foncé (riche en matière organique)	Marron claire (contient des systèmes racinaires)	marron-jaunâtre

Tableau 34. Caractéristiques physico-chimiques des sols étudiés du profil N° 01

Paramètres		Profil 01	H1	H2	H3
pH eau			6.76	7.38	7.57
pH kcl			5.96	6.30	6.44
CE (dS/m ⁻¹)			20.866	6.66	13.383
CaCO ₃ total (%)			0.05	0.40	0.80
CaCO ₃ actif (%)			/	/	/
CEC (cmol+.kg ⁻¹)			16	15.89	14.95
d(a) (g/cm ³)			1.78	1.96	1.80
Porosité P(%)			31.53	24.61	30.76
C(%)			2.862	0,655	0.103
MO(%)			4.937	1.130	0.178
N total (%)			0.10	0.097	0.089
C/N			28.620	6.753	1.157
Granulométrie	A (%)	2µm	22	26	42
	SG (%)	2µm	12	14.21	10.08
	SF (%)	0.2µm	28.5	30.11	27
	LG (%)	50µm	8.50	6.22	6.08
	LF (%)	20µm	23.10	19.02	16
Σ			Σp = 94.1%.	Σp=95.56%	Σp=101.16%



Photo 32 :
Station d'El hambli

Photo 33 :
Profil pédologique N° 1



Tableau 35. Description de Profil pédologique de la station Tassinga

Description du Profil 02. Tassenga			
Année	2015-2016		
Mois	Février		
Coordonnées de la station	Altitude : 850m		
	N : 36° 24' 11,00''		
	E : 6° 50' 39,25''		
Nombre de Profondeur	Trois profondeurs (horizons)		
Profondeur en (cm)	P1	P2	P3
	0-25	25-60	60-(+90)
Couleur et caractéristiques	Marron foncé, riche en matière organique	Marron claire, riche en système racinaires	Couleur claire,

Tableau 36. Caractéristiques physico-chimiques des sols étudiés du profil N° 02

Paramètres			Profil 02	H1	H2	H3
pH eau				6.5	6.24	6.27
pH kcl				5.47	5.95	5.74
CE (dS/m⁻¹)				9.663	2.840	2.990
CaCo₃ total (%)				0.26	0.30	0.30
CaCo₃ actif (%)				/	/	/
CEC (cmol+.kg⁻¹)				17.64	18.5	17
d(a) (g/cm³)				1.60	1.67	1.98
Porosité P(%)				38.46	35.76	23.85
C(%)				2.069	0.069	0.207
MO(%)				3.569	0.119	0.357
N total (%)				0.091	0.083	0.080
C/N				22.736	0.831	2.588
Granulométrie	A (%)	2µm		23.7	27.5	41.80
	SG (%)	2µm		14.45	13	17
	SF (%)	0.2µm		22.35	25	20.75
	LG (%)	50µm		10.50	9.51	12.25
	LF (%)	20µm		21.50	18.43	13.54
∑				∑p = 92.5 %	∑p= 93.44%	∑p= 105.34



Photo 34 :
Station Tassenga

Photo 35 :
Profil pédologique N° 2



Tableau 37. Description de Profil pédologique de la station de Matlegue

Description du Profil 03. Matlegue			
Année	2015-2016		
Mois	Avril		
Coordonnées de la station	Altitude : 760m		
	N : 36° 22' 33,00''		
	E : 6° 39' 06,25''		
Nombre de profondeur	Trois profondeurs (horizons)		
Profondeur en (cm)	P1	P2	P3
	0-20	20-50	50-(+65)
Couleur et caractéristiques	Marron	Marron claire, riche en système racinaires	Couleur claire

Tableau 38. Caractéristiques physico-chimiques des sols étudiés du profil N° 03

Paramètres		Profil 03	H1	H2	H3
pH eau			7.00	6.82	6.98
pH kcl			5.04	5.06	5.09
CE (dS/m ⁻¹)			3.410	2.410	3.820
CaCo ₃ total (%)			0.05	0.07	0.05
CaCo ₃ actif (%)			/	/	/
CEC (cmol+.kg ⁻¹)			18.08	20	18.86
d(a) (g/cm ³)			1.89	1.50	1.95
Porosité P(%)			27.33	42.17	24.92
C(%)			1.759	0.862	0.414
MO(%)			3.034	1.487	0.714
N total (%)			0.047	0.069	0.070
C/N			37.42	12.49	5.91
Granulométrie	A (%)	2µm	20.27	26	35.20
	SG (%)	2µm	11.23	13.5	15
	SF (%)	0.2µm	21.05	23	19.89
	LG (%)	50µm	14.50	12.30	11.50
	LF (%)	20µm	27.85	22.02	20
Σ			Σp= 94.9%	Σp= 96.82%	Σp= 101.59



Photo 36 :
Station Matlague

Photo 37 :
Profil pédologique N° 3



Tableau 39. Description de Profil pédologique de la station de Draa nagah

Description du Profil 04. Draa Nagah			
Année	2015-2016		
Mois	Avril		
Coordonnées de la station	Altitude : 770m		
	N : 36°22'34.57''		
	E : 6°41'57.09''		
Nombre de profondeurs	Trois profondeurs (horizons)		
Profondeur en (cm)	H1	H2	H3
	0-20	20-42	42-(+60)
Couleur et caractéristiques	Marron foncé (riche en matière organique)	Marron claire (contient des systèmes racinaires)	marron-jaunâtre

Tableau 40. Caractéristique physico-chimiques des sols étudiés du profil N° 04

Paramètres		Profil 04	H1	H2	H3
pH eau			7.14	6.65	6.50
pH kcl			5.04	5.24	5.08
CE (dS/m ⁻¹)			4.320	3.820	3.350
CaCo ₃ total (%)			0.05	0.10	0.05
CaCo ₃ actif (%)			/	/	/
CEC (cmol+.kg ⁻¹)			17.21	19	17.55
d(a) (g/cm ³)			1.93	1.66	1.95
Porosité P(%)			25.91	36.34	24.92
C(%)			0.345	0.345	0.414
MO(%)			0.595	0.595	0.714
N total (%)			0.042	0.037	0.065
C/N			8.214	9.324	6.369
Granulométrie	A %	2µm	24.12	28	31.11
	SG %	2µm	10.12	12	14.04
	SF %	0.2µm	23.25	30	28
	LG %	50µm	11.50	7	6.60
	LF %	20.µm	21.70	18.12	13
Σ			Σp=90.69%	Σp=95.12%	ΣP= 92.75%



Photo 38:
Station Draa Nagah

Photo 39:
Profil pédologique N° 4



2.1. Le potentiel hydrique pH (eau) et le pH (KCL)

La mesure du pH d'une suspension d'un échantillon de sol dans l'eau (pH eau) prend en compte la concentration en ions H_3O^+ à l'état dissocié dans le liquide surnageant. Ces ions sont en équilibre avec ceux présents à l'état non dissocié, fixés sur certains composants solides du sol tels que les minéraux argileux, les matières organiques.

Selon les tableaux (34, 36, 38, 40), le pH des sols étudiés varie entre un minimum de 6,24 (dans la station Tassenga H2) et un maximum de 7,57 (dans la station El hambli H3). La moyenne des valeurs du pH de l'ensemble des sols prélevés est de l'ordre de 7,24 avec un écart type de 0,7. D'après le SSDS. (1993), seule la station de Tassenga présente un pH légèrement acide (en moyenne 6,35). Cependant, les autres stations enregistrent des pH neutres ($6,6 > pH > 7,4$).

Par ailleurs, la figure 41 montre une certaine hétérogénéité entre les stations. Ceci est confirmé par l'Anova qui montre un effet station hautement significatif ($p < 0,001$). Le test de Newman-Keuls a permis de classer les stations étudiées en trois groupes homogènes. Ainsi, la station d'El hambli présente le pH le plus élevé (en moyenne 7,57 pour la profondeur H3), alors que les stations Matlegue et Draa nagah enregistrent les valeurs moyennes. La station de Tassenga présente des valeurs de pH faibles. Par ailleurs, la moyenne du pH kcl est variée entre 5.35 – 5.64 pour les différents horizons des profils étudiés.

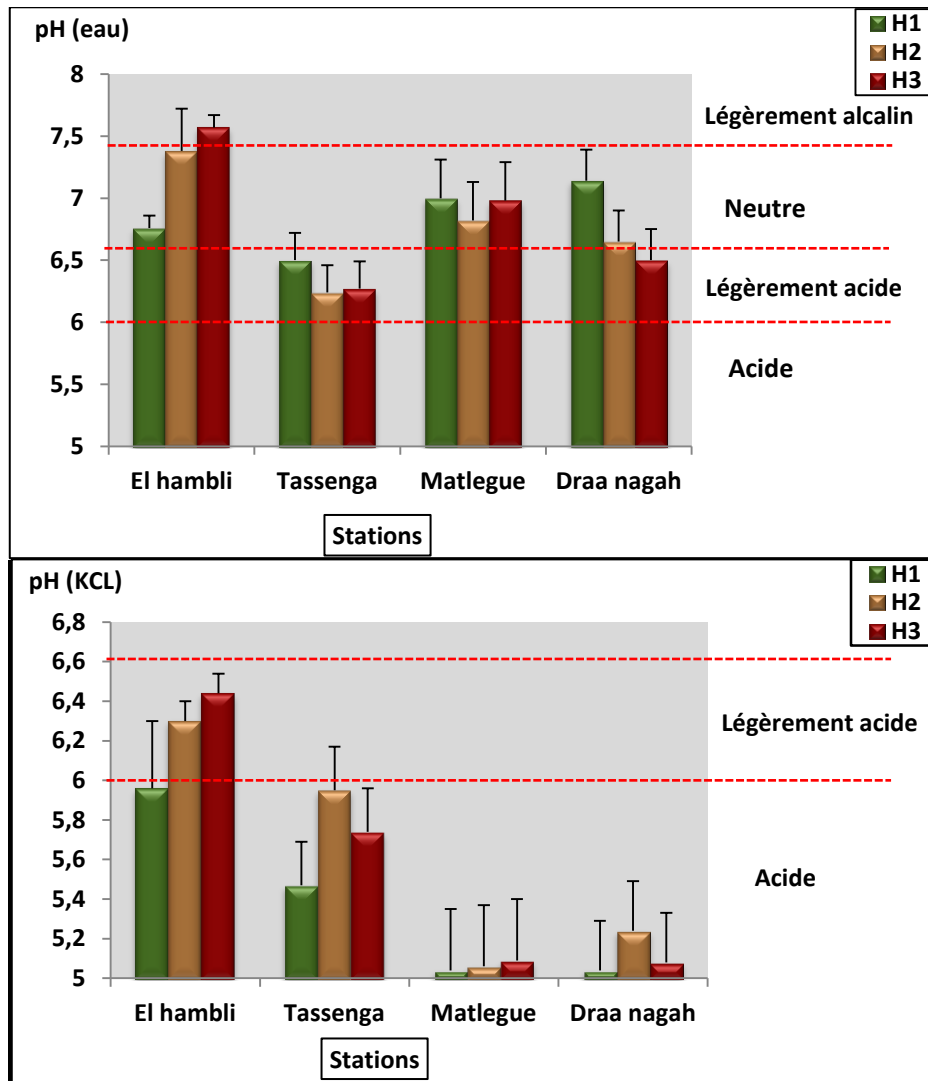


Figure 41. Variation du pH des sols des stations étudiées de la zone de Djebel Oauhch (Classes du pH selon SSDS, 1993)

2.2. La densité apparente D(a)

Les résultats des tableaux révèlent que la densité apparente est en moyenne de l'ordre de 1,80 (entre 1,5 et 1,98). La figure 42 montre que ce paramètre présente une variation très importante dans la station de Matlegue.

Globalement, les dernières profondeurs (H3) pour les différentes stations présentent des valeurs de densité apparente (a) plus élevées. En revanche, l'analyse de la variance (Anova) n'a pas révélée un effet station significatif pour la densité apparente (a).

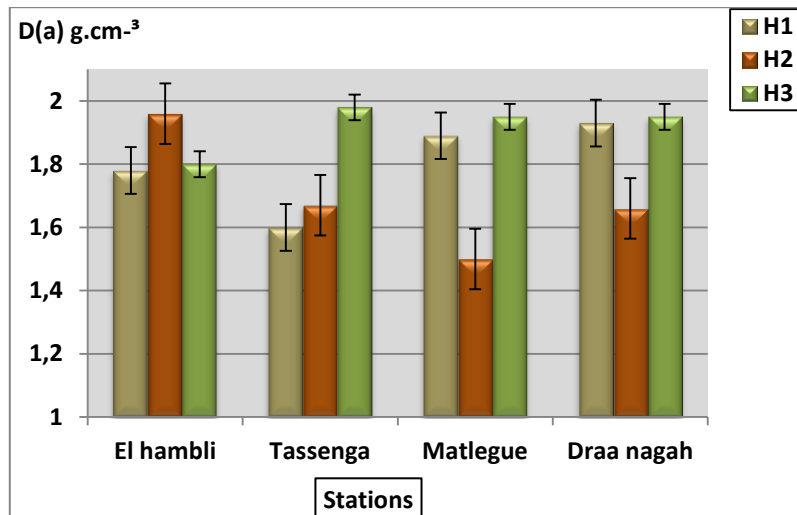


Figure 42. Variation des résultats de la densité apparente des sols des stations étudiées

2.3. La conductivité électrique (CE)

Les résultats des analyses de la conductivité électrique montrent que les valeurs s'échelonnent de 3,35 à 20,86 dS.m⁻¹ avec une moyenne de 6,46 dS.m⁻¹. Selon SSDS. (1993), les sols de la région d'étude sont à faiblement salins. Cette variation des valeurs de la CE entre les stations étudiées est hautement significative ($p < 0,001$).

Selon le test de Newman-Keuls, il ressort que la station El hambli présente une salinité élevée (en moyenne, 20.86 dS.m⁻¹, 6.66 dS.m⁻¹ et 13.38 dS.m⁻¹, pour H1, H2 et H3 respectivement) alors que les autres stations montre une salinité très faible. Le groupe intermédiaire formé par la station de Tassenga enregistre des valeurs moyennes de La conductivité électrique. Malgré cette différence (significative), ces deux groupes sont classés dans la catégorie des sols à faible salinité (Figure 43).

Le sol de la station de Matlegue et Draa nagah sont considérés comme très faible salin non salin ($CE < 4$ dS.m⁻¹).

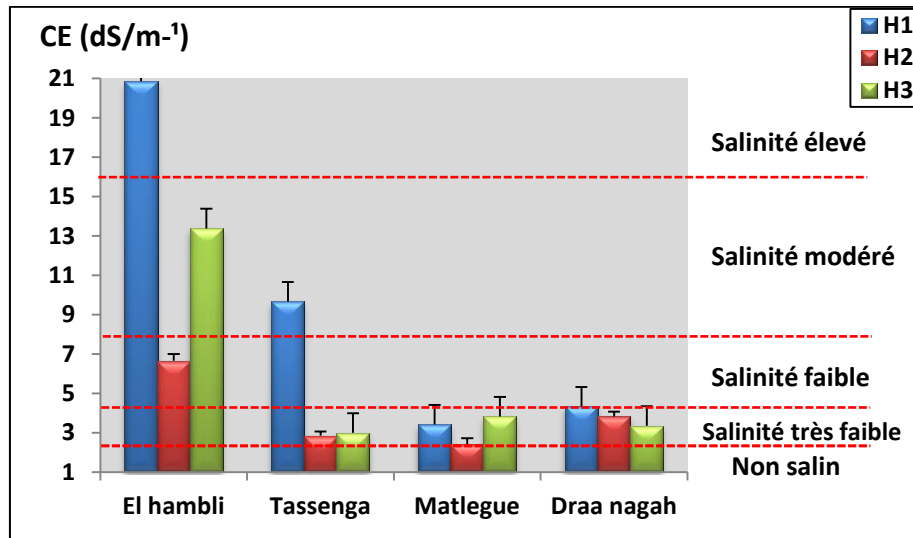


Figure 43. Variation de la conductivité électrique (CE) des sols des stations étudiées (Classes de salinité selon SSDS, 1993)

2.4. Le calcaire total (CaCO₃)

Les profils pédologiques montre des teneurs très faibles de calcaire, le taux varie entre un minimum de 0.05% et un maximum de 0.8% avec un moyenne de 0.20% pour tous les profondeurs (H1, H2 et H3) dans les quatre stations étudiées (Fig 44).

D'après les résultats du calcaire total, les profils étudiés présentent un taux de calcaire actif nul.

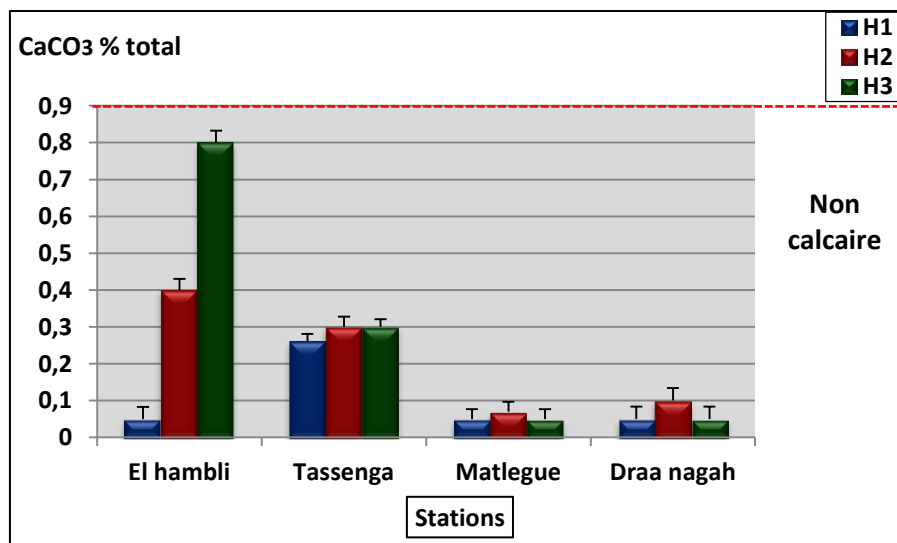


Figure 44. Variation de calcaire total des sols des stations étudiées (Classes du CT selon GEPPA in Baize, 1988)

2.5. La capacité d'échange cationique (CEC)

Les profils pédologiques des sols étudiés montrent une capacité d'échange cationique moyenne comprise entre 10 et 20 $\text{cmol}^+.\text{kg}^{-1}$.

L'Anova effectuée sur les données de la capacité d'échange cationique (CEC) confirme cette variation avec un effet station non significatif ($p = 0,116$).

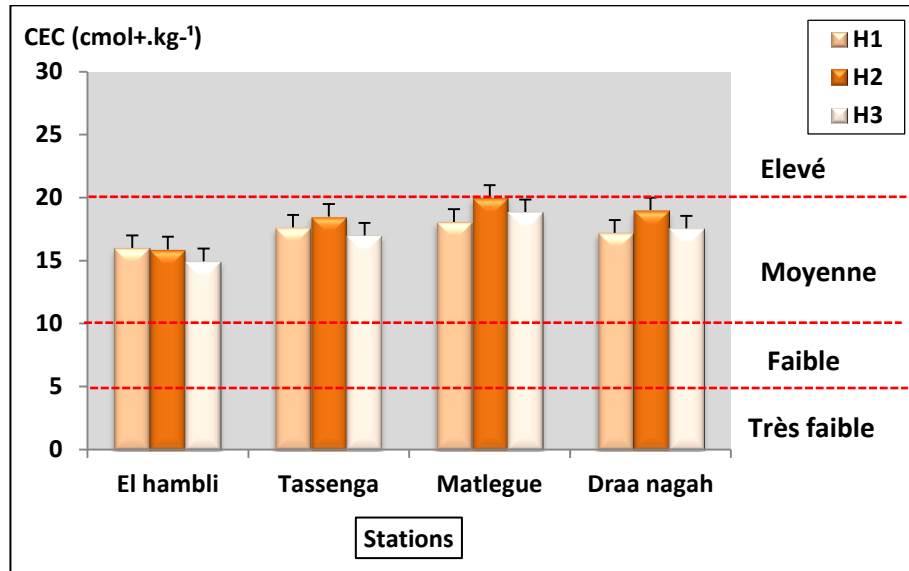


Figure 45. Variation de la capacité d'échange cationique (CEC) des sols des stations étudiées (Classes de la CEC selon Baize, 2000)

2.6. La matière organique (MO)

Selon les normes données par Hazelton et Murphy (2007), les trois premières stations présentent un taux de matière organique très élevé pour l'horizon 1, alors que les autres horizons présentent des teneurs faibles à très faible.

En effet, l'Anova réalisée fait apparaître un effet station très hautement significatif ($p < 0,0001$).

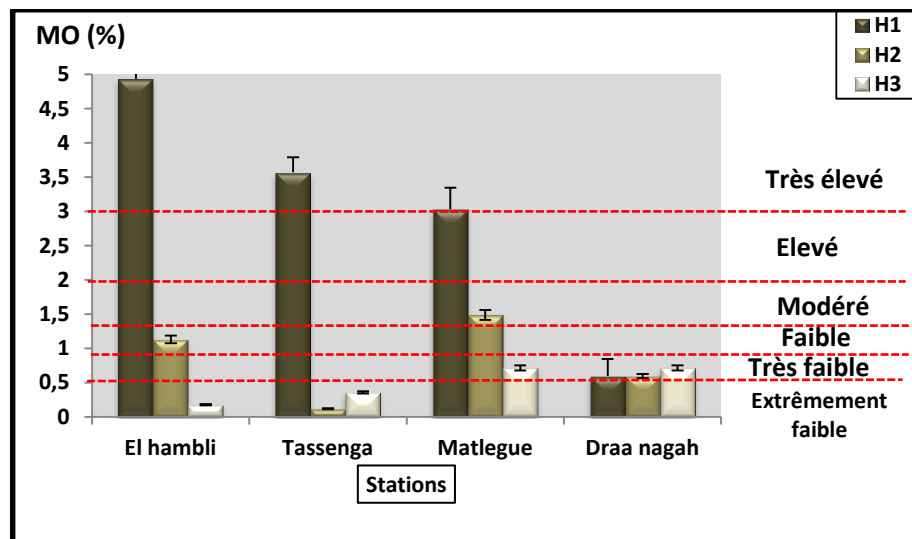


Figure 46. Variation de taux de matière organique (MO) des sols des stations étudiées (Classes de la MO selon Hazelton et Murphy, 2007)

2.7. L'azote total (N)

Les résultats obtenus montrent que tous les horizons des stations étudiés présentes des valeurs d'azote inférieur à 0.11%, donc faiblement riches en azote.

L'Anova effectuée sur les taux de d'azote (N) ne permet de déceler qu'un effet station significatif ($p = 0,122$). Malgré la variation du taux de N dans les différentes stations, elles forment un seul groupe présentant des taux moyens homogènes.

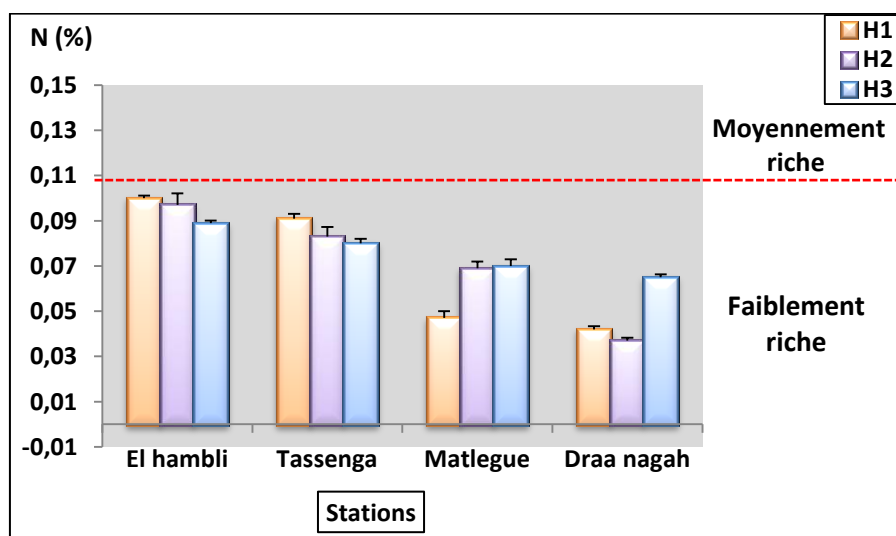


Figure 47. Variation de taux d'azote (N) des sols des stations étudiées (Classes de l'azote selon SSDS, 1993)

2.8. Le rapport (C/N)

Le rapport C/N est très élevé pour les horizons 1 des trois premières stations. Les stations d'El hambli et Matlegue sont considérées plus riches que les deux autres stations.

L'Analyse de la variation de ce rapport révèle un effet station très significatif ($p < 0,001$), avec deux groupes homogènes (selon le test de Newman-Keuls). Le premier, formé par la station El hambli et Matlegue, se distingue par un rapport très élevé pour l'horizon 1(en moyenne 12,17 et 18,60). La station Tassenga et Draa nagah, qui forme le deuxième groupe, enregistre les valeurs en moyenne 8,71 et 7,96.

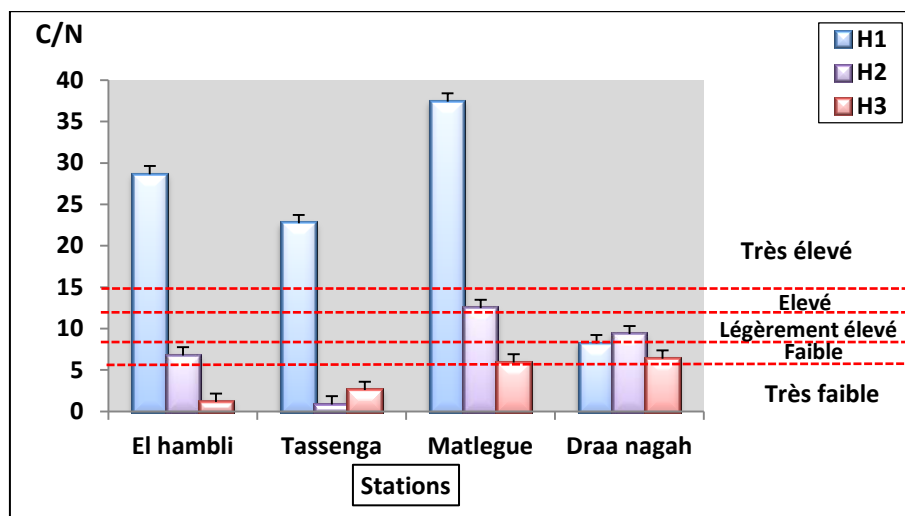


Figure 48. Variation de rapport C/N des sols des stations étudiées (Classes du ratio C/N selon LCA, 2008)

2.9. La texture

Concernant la fraction argileuse (A), elle correspond aux particules dont les dimensions sont inférieures à 2 μm . Selon les tableaux, le taux d'argile est en moyenne de 28,9 %. Il varie entre 27 % et 30 %. L'horizon 1 de chaque profil représente la valeur la plus faible par rapport aux autres horizons. Cette variation s'est révélée très significative ($p < 0,001$).

La fraction limoneuse (L), correspondant aux particules dont les dimensions sont comprises entre 2 et 50 μm , varie de 24 % à 36%, alors que le taux moyen de limon est de l'ordre de 29,23 % (tableaux). L'Anova montre un effet station hautement significatif ($p < 0,001$). La première profondeur (H1) de chaque profil étudié représente le taux de limon le plus élevé avec un moyen de 34.78%, alors que la deuxième profondeur (H2) représente le taux de limon moyen (28.15%) et la dernière profondeur (H3) représente le taux de 24.74%.

En ce qui concerne la fraction sableuse (S) correspond aux particules dont les dimensions sont comprises entre 50 µm et 2 mm. Elles varient de 34,5 % à 40,63 %, avec une moyenne de l'ordre de 37,96%. Cette fraction est donc la fraction la plus importante dans les sols étudiés, comparativement aux deux précédentes. Cependant, l'Anova présente des variations hautement significatives entre les stations ($p < 0,001$).

La moyenne du taux d'argile des sols étudiés varie entre 27 et 30% d'une station à un autre. L'horizon 1 de chaque profil représente la valeur la plus faible par rapport aux autres horizons, où la moyenne d'argile varie entre 22 – 24.12 % pour la première profondeur, 26 - 28 % pour la deuxième profondeur, et 32-42% pour la troisième profondeur dans les différentes stations. Tandis que, le dernier horizon de chaque profil présente le taux le plus élevé (32 – 42%). On peut dire que, l'examen de la figure 49 montre une faible variation du taux d'argile des sols étudiés.

Pour ce qui est des limons (fins et grossiers), leurs teneurs varient de 22.08% à 31.6% pour le premier profil dans la station de El hambli, 25.79% à 32% pour le deuxième profil (Tassenga), 31.5% à 42.35% pour le troisième profile (Matlegue) et 19.6 à 33.2% pour le dernier profil (Draa naga) d'un horizon à un autre.

En ce qui concerne les taux de sable (fins et grossiers), leurs taux oscillent entre 37% et 44.32% avec une moyenne de 35.74% pour H1, 40.21% pour H2 et 37.94% pour H3 dans les différentes stations étudiées. Les teneurs en sable semblent être homogènes pour les quatre profils et élevé comparativement à les teneurs de limon et argile.

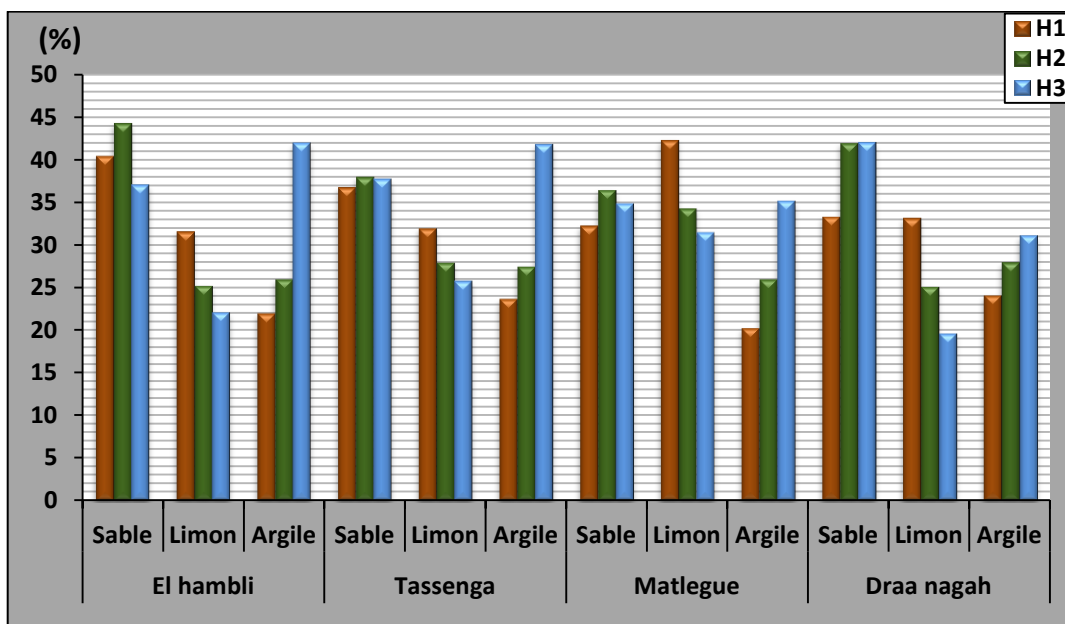


Figure 49. Variation des teneurs des fractions granulométriques des sols prélevés

La projection des résultats des 3 fractions granulométriques des sols étudiés sur le triangle textural américain (SSDS., 1993) a été réalisée par le logiciel R-Software, en utilisant le package 'soiltexture' (Fig 50). D'après cette figure, les sols étudiés présentent les classes texturales suivantes :

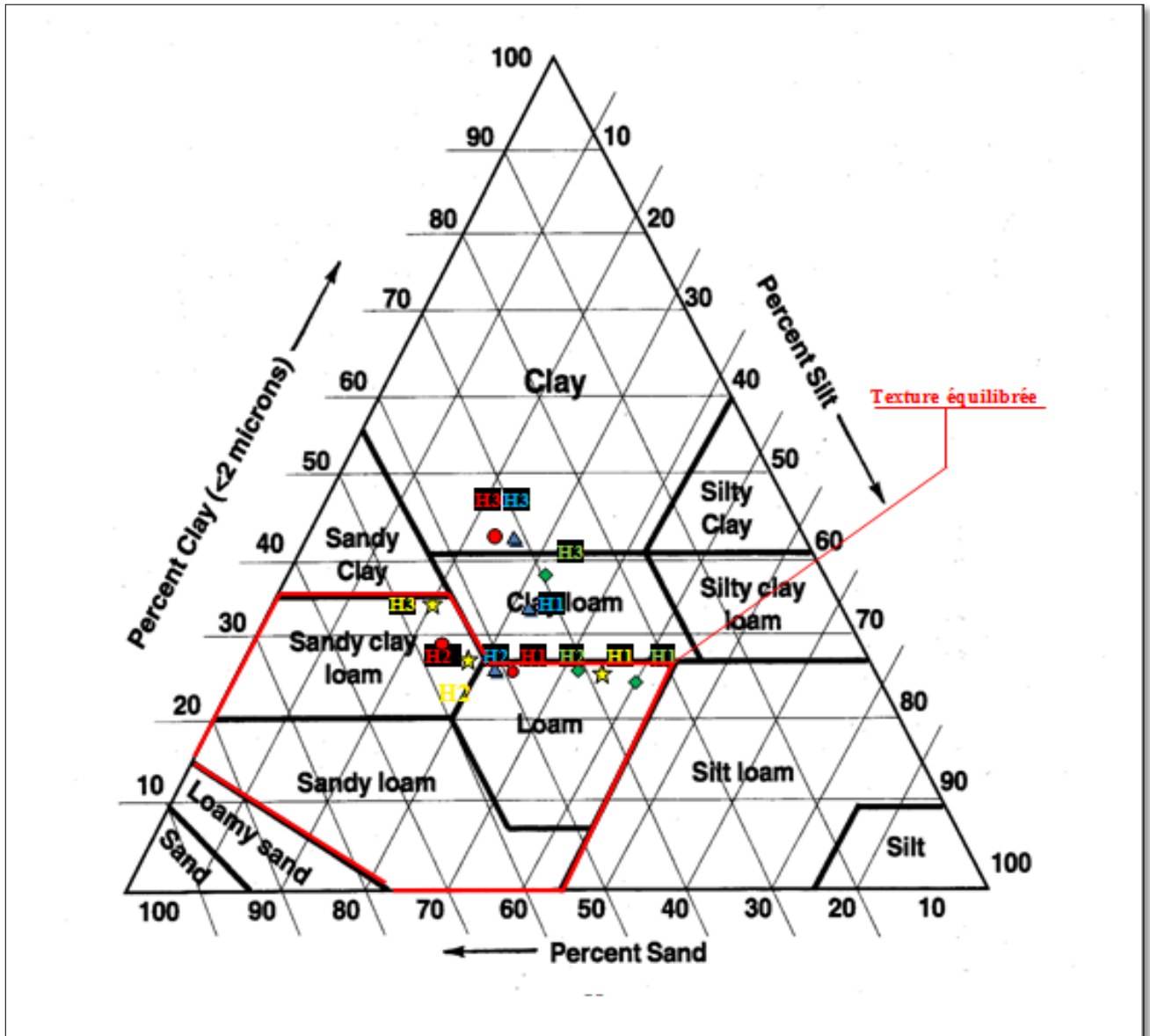


Figure 50. Classification des sols étudiés dans la région de Djebel Ouahch selon triangle textural Américain système USDA (SSDS, 1993)

❖ Pour les trois profondeurs des stations étudiées :



Station d'El hambli : Horizon **H1** : Texture : Limono équilibrée
Horizon **H2** : Texture : sablo-argileuse équilibrée
Horizon **H3** : Texture : Argileuse



Station de Tassenga : Horizon **H1** : Texture : Limono-argileuse
Horizon **H2** : Texture : équilibrée
Horizon **H3** : Texture : Argileuse



Station de Matlegue : Horizon **H1** : Texture : équilibrée
Horizon **H2** : Texture : équilibrée
Horizon **H3** : Texture : Limono-argileuse



Station de Draa nagah : Horizon **H1** : Texture : Limono équilibrée
Horizon **H2** : Texture : sablo-argileuse équilibrée
Horizon **H3** : Texture : Sablo-argileuse équilibrée

2.10. Relation entre les paramètres physico-chimiques des sols étudiés

La figure 51 montre la représentation graphique des 15 paramètres à l'intérieur du cercle de corrélation sur le plan factoriel 1-2.

L'axe 1 est représenté par les paramètres MO, C/N, LF, P, LG et CEC qui sont corrélés positivement, dans la mesure où ces derniers présentent les plus fortes contributions. À l'opposé de cet axe est représenté par les paramètres CE, N, pH KCL, pH eau, CaCO_{3t}, d(a), A, SF et SG.

L'axe 2 est représenté par les 10 paramètres tels que CE, MO, C/N et CaCO_{3t} qui présentent les contributions les plus élevées. Sur le côté négatif de ce même axe, la Capacité d'échange cationique (CEC), l'argile (A), LG, SG, et densité apparente D(a) sont caractérisées respectivement par les plus faibles contributions.

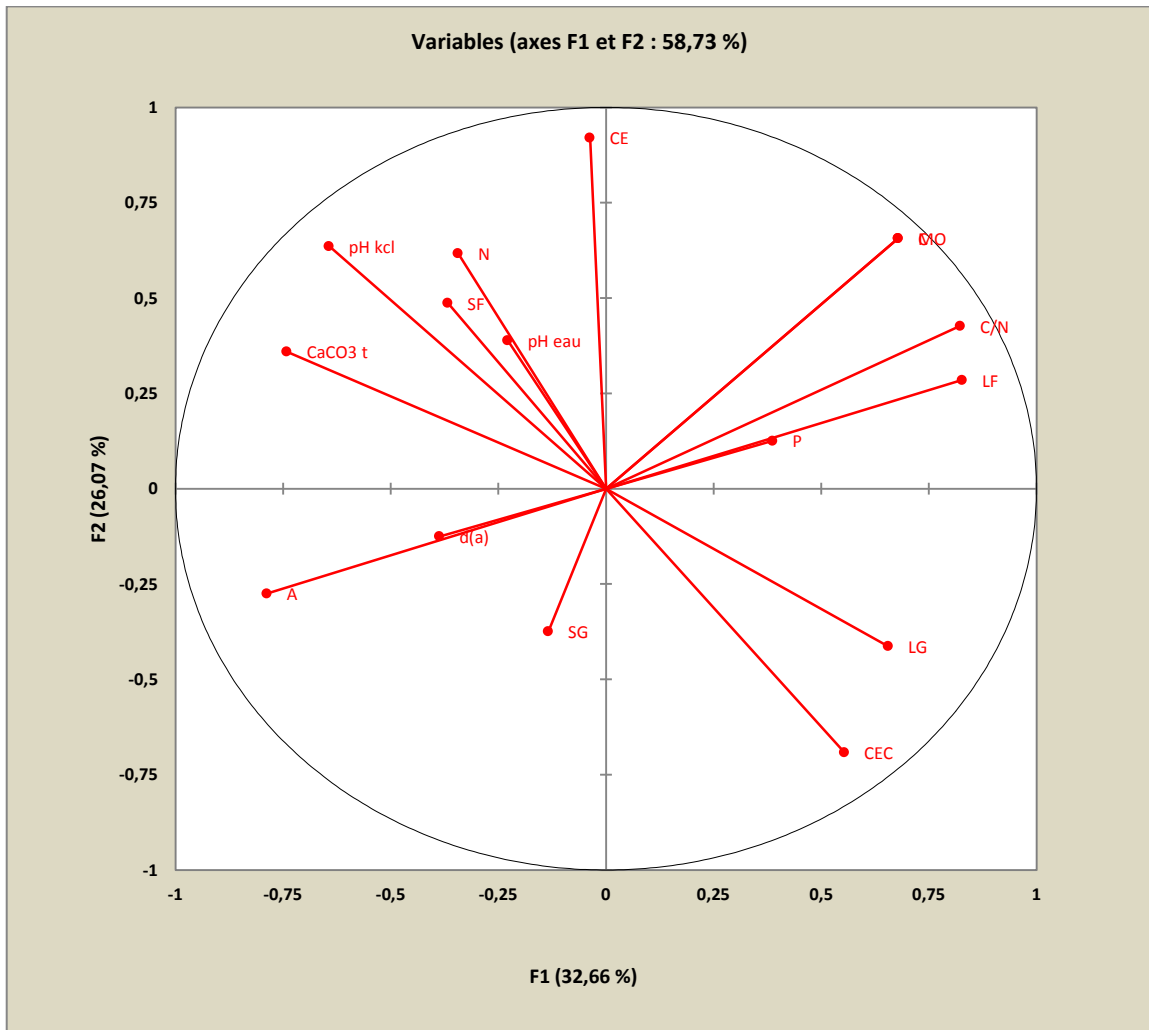


Figure 51. Corrélations entre les propriétés physicochimiques des sols étudiés

Les résultats obtenus dans le tableau (1), annexe (4) montrent une corrélation positive entre le pH (KCL) et le calcaire total (CaCO₃t) ($r = 0.818$), ainsi que l'azote (N) ($r = 0.766$). La Capacité d'échange cationique (CEC) est négativement corrélée avec celle de pH (KCL) ($r = -0.748$), la conductivité électrique (CE) ($r = -0.669$) et le calcaire total ($r = -0.636$).

Une corrélation positive est observée entre la CE et le carbone, la matière organique et l'azote ($r = 0.630$) ($r = 0.630$), ($r = 0.600$) respectivement, et une corrélation négative entre le sable fine et le limon grossier ($r = -0.888$).

2.11. Discussion

D'après les différents résultats physico-chimiques, les sols étudiés dans la région de Djebel Ouahch présentent une certaine hétérogénéité physico-chimique. Cependant, ils présentent une texture équilibrée, avec un faible taux en argile (environ 27 %). De ce fait, la porosité serait importante, favorisant la circulation de l'air et de l'eau.

Le pH est un paramètre très important de la dynamique du sol car le degré d'acidité ou de basicité joue un rôle très important sur l'assimilation des éléments dans le sol. Il a une influence sur trois processus importants dans le sol : la biodisponibilité des nutriments, l'activité biologique et la stabilité structurale. La variation du pH dépend des variations saisonnières et du pouvoir tampon du sol (le nombre d'ions en réserve dans le complexe argilo-humique), de l'état hydrique du sol, de sa température et de la présence ou non d'une culture en période de croissance active (Baize, 2000).

En pédologie, dans le cas des sols acides, il est intéressant de déterminer le pH d'une suspension de sol dans une solution de chlorure de potassium (pH kcl).

La moyenne du pH eau des sols étudiés dans la région de Djebel Ouahch est de 7.24 pour le premier profil à la station d'El hambli, 6.34 pour le deuxième profil (Tassenga), 6.93 pour le troisième profil (Matlegue) et 6.76 pour le dernier profil (station de Draa nagah) ; alors que, la moyenne du pH kcl est variée entre 5.35 – 5.64 pour les différents horizons des profils étudiés.

Le pH, des sols étudiés sont neutres à légèrement basiques probablement du fait de la nature du matériel géologique à prédominance de calcaires (Mébarki, 1984).

Les résultats obtenus concordent avec ceux de Korichi et Megrerouche, (2003). Ces auteurs ont enregistré des pH compris entre (7.47 - 7.7 pour cinq profils) et (6.92) pour les auteurs Aouiche et Bouhidel, (2003).

Plusieurs auteurs ont montré que le pH des sols dépend de l'origine de la nature géologique du substrat ; En effet, les sols de la région de Constantine reposent sur une formation carbonatée (Djebbar et al. 2004; Mebarki, 2005).

Selon El-Hadef El-Okki (2016), le pH des sols de bordures de l'Oued Rhumel varie entre un minimum de 7,2 et un maximum de 7,8.

La conductivité électrique permet aussi de déterminer le degré de la salinité du sol. Elle définit la quantité totale en sels solubles correspondant à la salinité globale du sol, elle dépend de la teneur et de la nature des sels solubles présents dans ce sol (Guessoum, 2001).

La CE est utilisée pour le diagnostic de la salinité des sols. Ce paramètre est en relation avec les cations Ca^{2+} et Na^+ dus principalement à l'altération des roches sous l'influence des facteurs physiques (Girard et al. 2005).

Les valeurs extrêmes de la conductivité électrique des sols étudiés varient entre 3,4 – 20,86 dS.m⁻¹ pour l'horizon 1, 24 – 6,66 dS.m⁻¹ pour l'horizon 2, et 2,99 – 13,38 dS.m⁻¹ pour l'horizon 3 dans les différentes stations étudiées.

L'analyse de la conductivité électrique (CE) montre qu'elle est très faible, indiquant que notre sol est non salé pour les différentes profondeurs étudiées.

Les résultats des analyses de la CE montrent que les valeurs s'échelonnent de 1,39 à 4,87 dS.m⁻¹ avec une moyenne de 2,71 dS.m⁻¹ et un écart-type de 0,87 dS.m⁻¹ (El-Hadef El-Okki, 2016).

Le calcaire total représente une réserve lentement mobilisable de calcium. Ce dernier possède un pouvoir flocculant par rapport aux argiles et aux composés humiques, d'où la formation du complexe argilo-humique (Baize, 2000). Il contribue ainsi à l'organisation de la structure et à la stabilité de cette structure. En plus, le calcaire total conditionne la réaction du sol. Ainsi, les faibles teneurs en calcaire sont liées au caractère acide tandis que les fortes teneurs dénotent un milieu basique.

Dès un sol ou un horizon est calcaire, de façon généralisée et même faiblement, le pédologue et l'agronome seront sûrs d'être dans une ambiance physico-chimique bien particulière, caractérisée par la surabondance de l'ion Ca^{++} , un pH élevé, une saturation du complexe d'échange.

A partir des résultats du calcaire total, la moyenne pour tous nos sols étudiés dans la région de Djebel Ouahch est de l'ordre de 0,20%, donc présentent un taux de calcaire actif nul; Ces résultats obtenus concordent avec ceux de Aouiche et Bouhidel, (2003). Ces auteurs ont enregistré des taux de calcaire nul dans les différentes profondeurs étudiées de la zone de Djebel Ouahch. L'absence totale de cette fraction influence le taux de saturation du complexe adsorbant en Ca^{++} qui est un élément fréquent dans la fluctuation des colloïdes (Duthyl, 1973).

D'après Ruellan (1999), la fraction grossière de calcaire présente dans le profil (sous forme de concrétion, ou de croute) est une particularité très commune des sols des régions arides et semi aride, lorsque la roche mère sous-jacente présente une prédominance de formations calcaire.

La conductivité d'échange cationique (CEC) correspond à la quantité de cations qu'un sol peut retenir sur son complexe adsorbant à un pH donné. Autrement dit, cette mesure représente la totalité des charges négatives disponibles pour la fixation des bases échangeables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+). Cette propriété dépend ainsi des taux d'argile et de l'humus dans le sol et des valeurs du pH (Duchaufour, 1991).

Les résultats obtenus montrent que les valeurs de la CEC varient de 14,95 $\text{cmol}^+\cdot\text{kg}^{-1}$ à 16 $\text{cmol}^+\cdot\text{kg}^{-1}$ (dans la station El hambli). Le sol de notre région étudié (les 4 stations) est de type moyen, ainsi une fertilité moyenne.

La matière organique (MO) du sol joue un rôle très important dans la stabilité du sol, l'augmentation de la capacité de rétention en eau du sol et la fixation des éléments minéraux. Le contenu en matière organique des sols est influencé globalement par les facteurs climatiques, la végétation, la texture du sol, les conditions topographiques, influençant le microclimat, le drainage et les pratiques culturales (Drouet, 2010). Elle représente ainsi un indicateur important de la dégradation de la qualité des sols.

Dans les échantillons de sol non calcaires, tout le carbone est celui engagé dans les molécules, de toutes dimensions, des matières organiques. Cette dernière représente un réservoir important dans le cycle du carbone. Des études récentes ont démontrées l'importance de la séquestration du CO_2 atmosphérique dans ce réservoir : le carbone est d'abord immobilisé dans le tissu des végétaux avant d'être soit partiellement minéralisé, soit partiellement stabilisé dans le sol sous forme d'humus (Van Wesemael, 2006).

Les résultats obtenus montre que les valeurs les plus élevées de la matière organique sont observés au niveau de premier horizon pour les stations étudiées, elles varient entre 3- 4.93% ; alors que, les valeurs les plus faibles sont enregistrées au niveau de dernier horizon (H3) pour la station de El hambli et Matlegue (0.178 et 0.714%).

D'après Duthil (1973), le taux de matière organique est normal lorsqu'il est inférieur à 4, ce qui est le cas de la plupart des sols de la région d'étude. Les sols dépassant un taux de 4%, sont considérés comme humifères par le même auteur. Ce qui est le cas pour l'horizon 1 de la première station (El hambli).

Contrairement à la plupart des autres éléments présents dans le sol, l'azote ne provient jamais de l'altération des roches. Il se retrouve sous 3 formes organique, ammoniacale et nitrique. La forme organique constitue les réserves du sol en cet élément (Baize, 2000). Il est combiné à des atomes de carbone qui constituent la matière organique.

D'après les résultats, les teneurs extrêmes en azote total sont de 0.1% pour le maximum et de 0.037% pour le minimum avec des moyennes de (0.07% pour H1, 0.071% pour H2 et 0.076% pour H3). De ce fait, les sols analysés sont pauvres en azote.

Le rapport C/N est un indicateur du bon fonctionnement du sol. Il est souvent utilisé pour évaluer le degré d'évolution de la matière organique (MO) et son aptitude à se décomposer plus ou moins rapidement dans le sol. Cette décomposition est assurée par les microorganismes du sol. En fait, le carbone sert avant tout comme source d'énergie pour ces organismes alors que l'azote est converti en acides aminés ou en azote ammoniacal par hydrolyses et désaminations (Duchaufour, 1991).

D'après Gagnard et al.1988, le rapport C/N ou rapport de carbone est un indicateur qui permet de juger du degré d'évolution de la matière organique, c'est-à-dire de son aptitude à se décomposer plus ou moins rapidement dans le sol.

Dans notre étude, une valeur moyenne maximale de 24.24 est observée au niveau de la profondeur (H1) pour l'ensemble des stations étudiées, une moyenne de 7.34 pour H2, et une valeur minimale de 4 été observée au niveau de troisième profondeur (H3).

Pour une meilleure appréciation des différentes relations existantes entre les paramètres étudiés, une analyse en composante principale (ACP) a été réalisée sur l'ensemble des données des différents points de prélèvements.

La figure 51 représente les deux premiers axes qui résument respectivement 32,66 % et 26,07 % de l'information totale.

L'examen de ce plan factoriel permet de visualiser les corrélations enregistrées entre les différentes propriétés des sols. En effet, la figure 51 montre une typologie générale déjà observée sur la matrice des corrélations (Annexe 4, Tableau 1).

Globalement, on peut observer que les propriétés des sols étudiés sont beaucoup plus liées à la teneur des sols en sable. Cependant, la fraction argileuse semble expliquer le taux d'humidité alors que la densité apparente est dépendante de la fraction grossière des sols.

3. Effet des variations thermiques saisonnières sur les paramètres morphologiques

3.1. Teneur en eau

Les graines d'une grande partie des espèces végétales peuvent conserver leur faculté germinative pendant plusieurs années ; il a été observé que le séchage et les basses températures favorisaient leur conservation. Mais il existe des graines pour lesquelles de telles conditions de conservation sont néfastes.

Les tableaux (1, 2, 3) annexe (5) récapitulent les principaux résultats de la teneur en eau (Taux d'humidité) chez les graines, les coques, les téguments, les amandes et les amandes plus téguments du pin pignon (*Pinus pinea L.*).

La figure suivante 52 montre les variations de taux d'humidité moyenne (N=20) des semences de pin pignon.

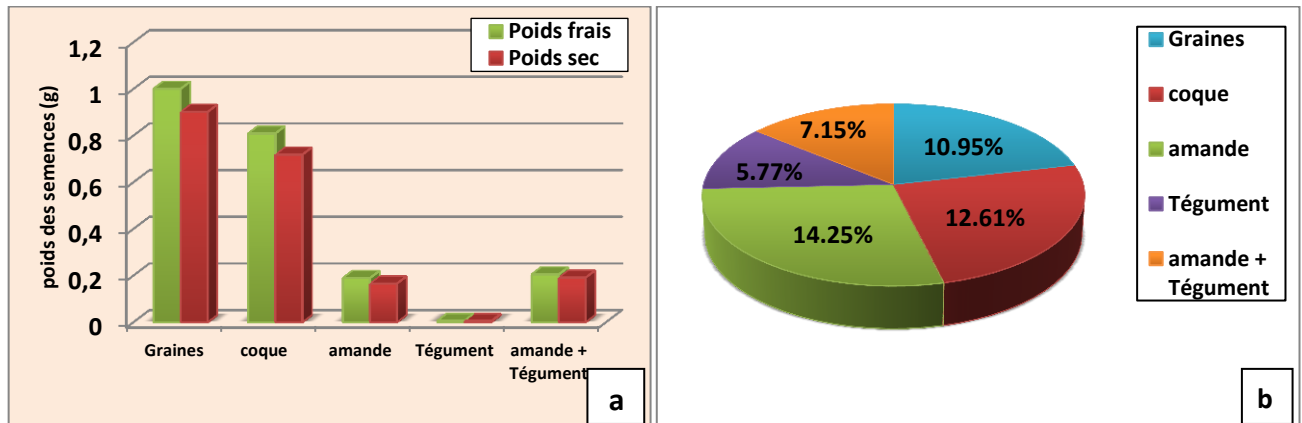


Figure 52. a: Teneur en eau moyenne (N=20), b: Taux d'humidité

L'Anova montre qu'il existe trois groupes, le premier groupe correspond à l'amande avec le taux le plus élevé (14.25%), le deuxième groupe englobe la graine et la coque et le dernier groupe dépend au tégument et l'amande plus tégument avec les taux faible (5,77% et 7,15%). Une teneur en eau optimale est nécessaire pour déclencher la germination des graines tandis qu'une teneur de plus en plus importante est exigée pour la croissance des semis.

3.2. Capacité germinative des graines

Le tableau (4), annexe (5) récapitule les catégories de la vitesse germinative étudiée. Le pourcentage de germination est globalement maximum après 1 mois de stratification mais la vitesse de germination augmente graduellement.

Les graines imbibées dans l'eau pendant 48h du temps ont le taux de germination le plus élevé, alors que les graines sans coque et sans tégument ont le taux le plus faible.

Les essais et les résultats que nous venons de présenter laissent apparaître un taux et une vitesse de germination élevée pour le traitement T1 (graines imbibées dans l'eau pendant 48h) alors que le traitement T4 (graines sans coque et sans tégument) ont le taux le plus faible.

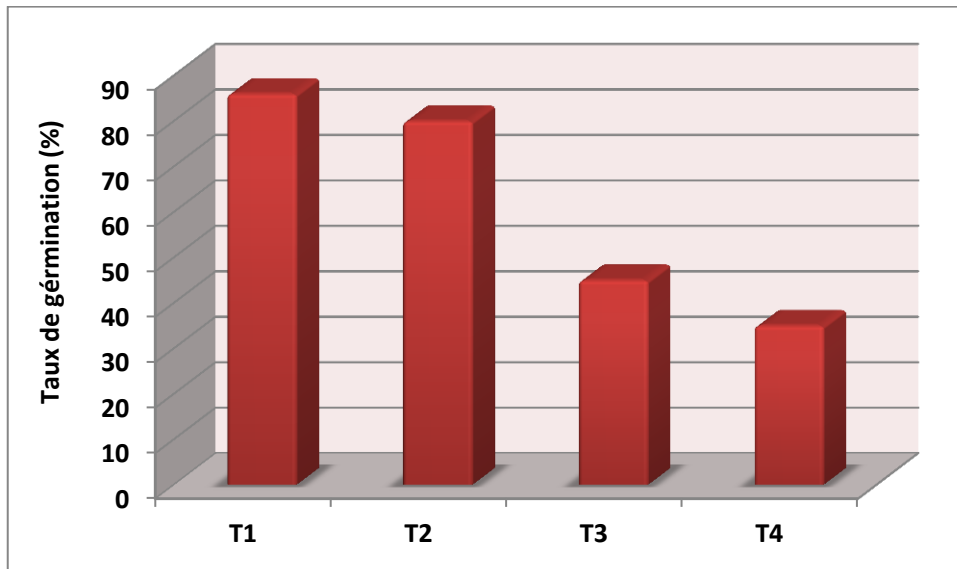


Figure 53. Taux de germination des graines de pin pignon

L'analyse de la variance révèle qu'il existe des différences très significatives entre les différents régimes de germination ($P < 0.0001$) (Annexe 5, Tableau 5).

Lorsque les graines arrivées à maturité sont placées dans des conditions optimales de température, d'humidité et d'oxygénation pour leur croissance et qu'elles ne germent pas, plusieurs types de causes sont à envisager : la dormance de l'embryon ou les inhibitions de germination.

Les résultats obtenus montrent que la coque et le tégument jouent un rôle important pour la protection des graines, mais dans certains cas ils peuvent empêcher la germination en jouant le rôle de barrière physique (résistance mécanique, imperméabilité à l'eau) ou de barrière chimique (piégeage de l'oxygène par des composés phénoliques).

L'une des caractéristiques qui pourrait être le fait d'une mauvaise adaptation du pin pignon (*Pinus pinea* L.), repose sur les fortes variations climatiques interannuelles caractéristiques du climat méditerranéen. Cet aspect qui sera analysé ici au travers l'étude des variations de la croissance. L'effet du cumul des températures extrêmes froides et chaudes

induit une réduction significative de la production de biomasse totale concomitante à une réduction de la croissance des tiges et des racines.

3.3. Mesures morphologiques

Les objectifs de ce travail est la quantification de la croissance aérienne et racinaire des semis en sachet des différents volumes V1, V2, V3 et V4 au cours des saisons, ainsi que la répartition de la biomasse entre les différentes parties de la plante. Les mesures concernant les paramètres suivantes : longueur de la partie aérienne (**LPA**), longueur de la partie racinaire (**LPR**), poids frais de la partie aérienne (**PFA**) et racinaire (**PFR**), et le poids sec de la partie aérienne (**PSA**) ainsi que le poids sec de la partie racinaire (**PSR**).

3.3.1. Evolution de longueur de la partie aérienne (LPA)

La figure 54,a montre l'évolution de l'allongement caulinaire au cours des saisons. Les résultats montrent que la croissance en hauteur est progressive durant les quatre saisons de l'année. La courbe d'évolution de la hauteur se caractérise par un démarrage moyen durant la période hivernale atteignant en moyenne 5.18 cm, suivie par une augmentation remarquable durant la période printanière et estivale (8.60 et 12.47cm respectivement).

La figure 54,b présente les taux de croissance aérienne durant les quatre saisons de l'année. Globalement, la longueur la plus élevée est notée chez les semis pendant le printemps avec un taux de croissance de 34 % par rapport à la croissance totale, alors que la saison hivernale montre le taux faible (14 %).

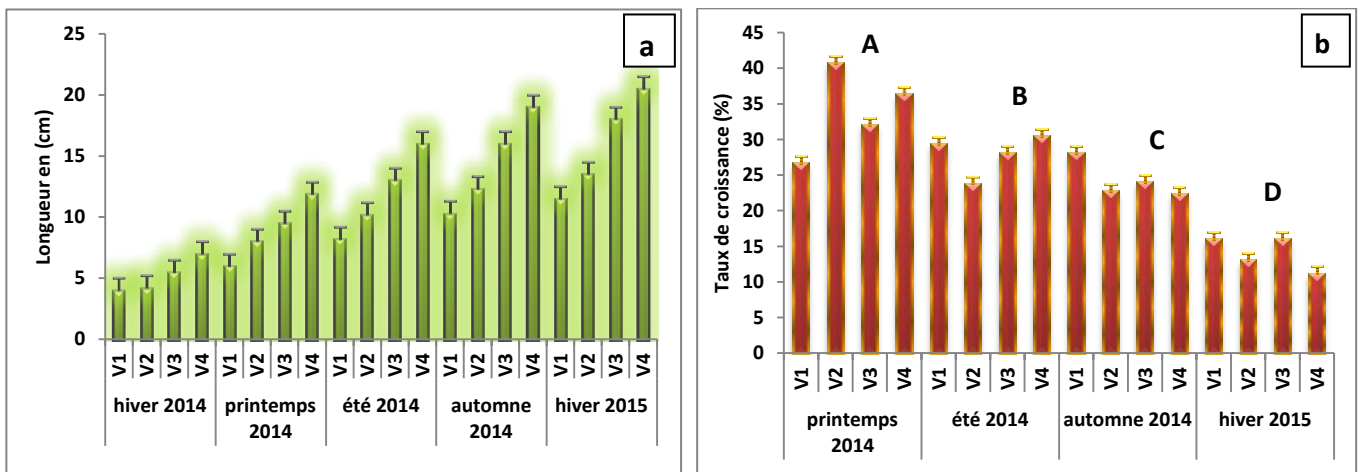


Figure 54. Variation saisonnière de la longueur de la partie aérienne au cours de l'année
a: longueur mesurée en (cm) ; b: taux de croissance en (%)

Ces variations sont confirmées par l'analyse de la variance à deux critères de classification qui montre des différences très hautement significatives entre les saisons ($p < 0,0001$). La comparaison des moyennes par le biais du test de Newman et Keuls fait ressortir quatre groupes homogènes ou le premier groupe (A) concerne la saison printanière avec la moyenne maximale (34%), alors que le dernier groupe (D) correspond au période hivernale avec la moyenne minimale (14%) (Annexe 6, Tableau 1).

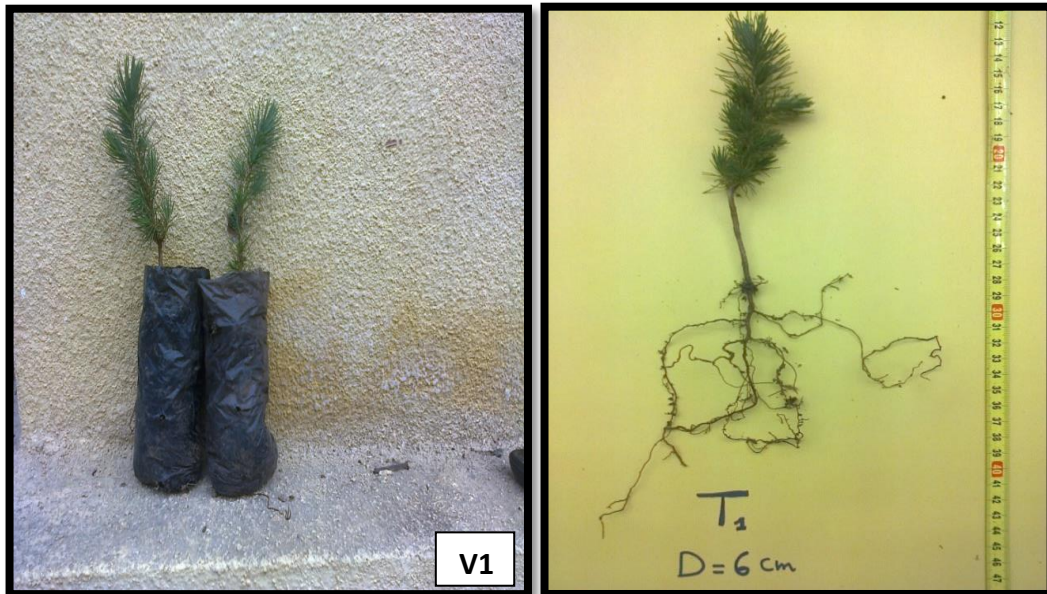


Photo 40. Semis de pin pignon après une année de croissance (2015)



Photo 41. Semis de pin pignon après une année de croissance (2015)

3.3.2. Evolution de longueur de la partie racinaire (LPR)

La longueur cumulée des racines durant les quatre saisons de l'année des différents volumes V1, V2, V3 et V4 est illustrée dans la figure 55. On remarque que la courbe de croissance racinaire présente une allure sensiblement identique avec celle des tiges. Les racines des semis de pin pignon gagnent durant la période printanière ($8.55 \pm 0.63 \text{cm}$) (soit un taux de 42.38%) alors que ce gain est égale à $1.5 \pm 0.32 \text{cm}$ pour la saison hivernale (soit un taux de croissance de 7.68%).

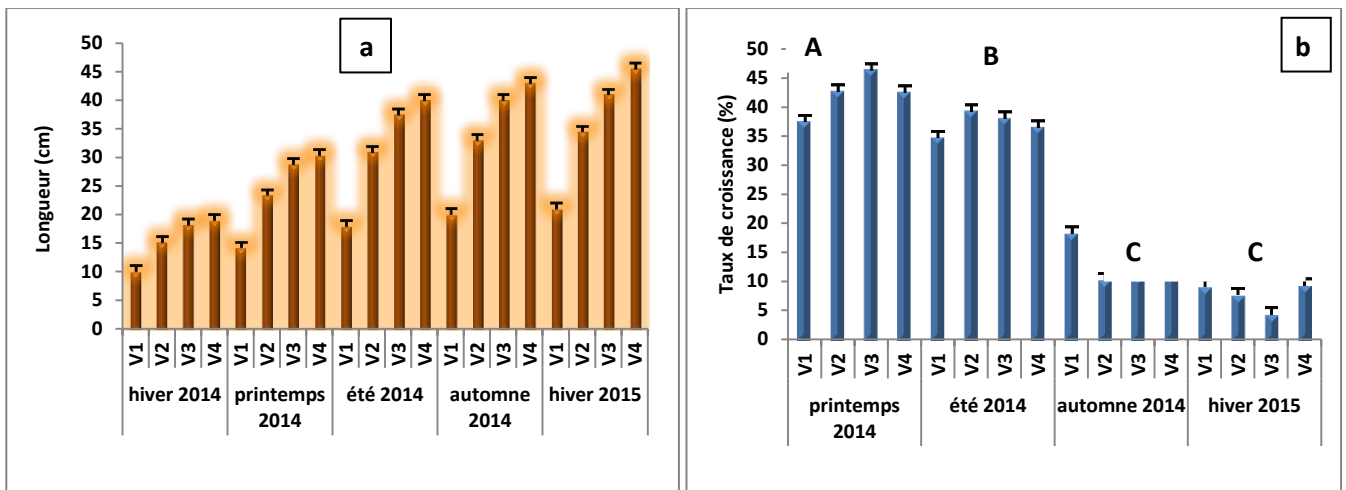


Figure 55. Variation saisonnière de la longueur de la partie racinaire au cours de l'année
a: longueur mesurée en (cm) ; b: taux de croissance en (%)

L'analyse de la variance est très hautement significative en fonction des saisons de l'année ($p=0.000$). Les comparaisons des moyennes réalisées par le biais du test de Newman et Keuls au seuil de 5% , nous donnent trois groupes distincts, où on note que le premier groupe (A) correspond à la saison du printemps avec une valeur maximale de 42.38% , le dernier groupe (C) englobe les saisons automnale et hivernale avec les plus faibles moyennes (12.74 et 7.68%) (Annexe 6, Tableau 1).

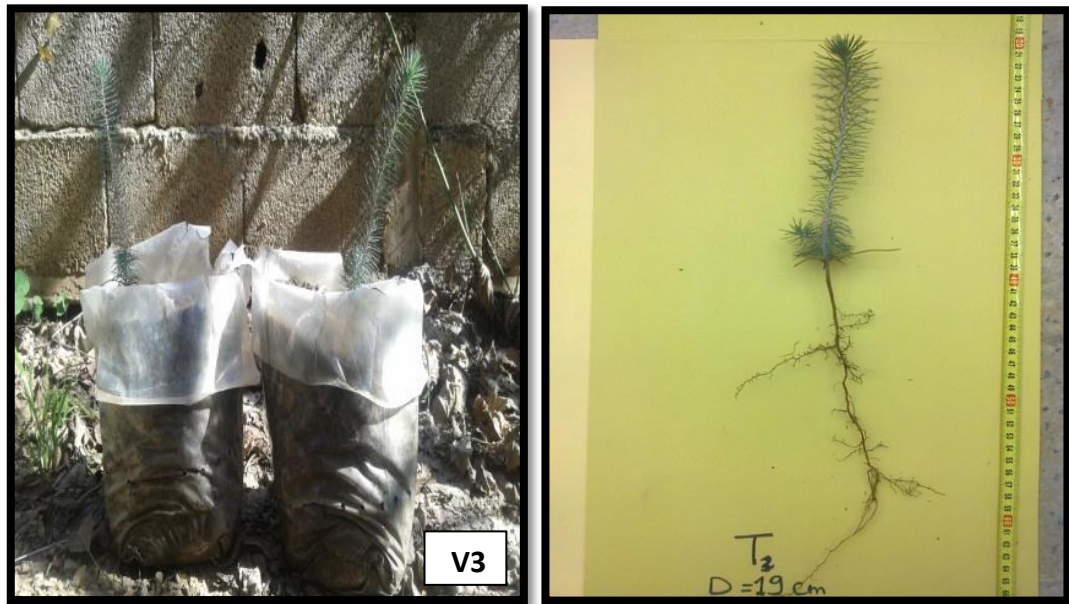


Photo 42. Semis de pin pignon après une année de croissance (2015)

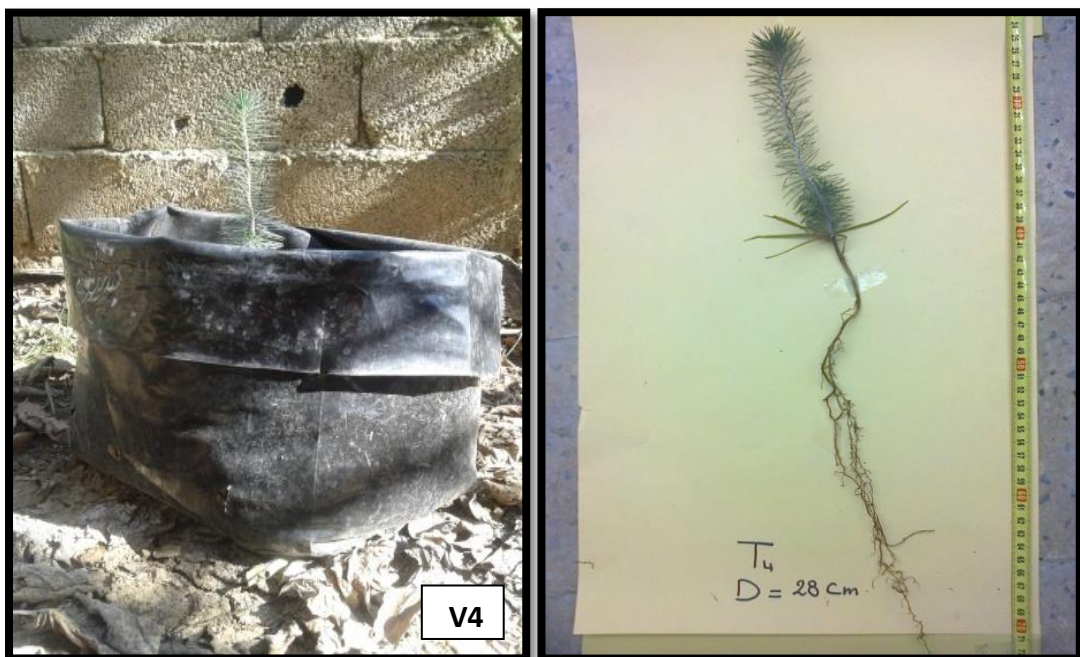


Photo 43. Semis de pin pignon après une année de croissance (2015)

3.3.3. Rapport longueur partie racinaire/longueur partie aérienne (LPR/LPA)

Le rapport de la longueur de la partie aérienne et souterraine des semis de pin pignon durant les quatre saisons est illustré dans la figure 56. On remarque une variation régressive, elle présente des diminutions importantes selon les saisons. La valeur maximale est enregistrée durant la saison printanière, par contre la valeur minimale est enregistrée à la saison hivernale.

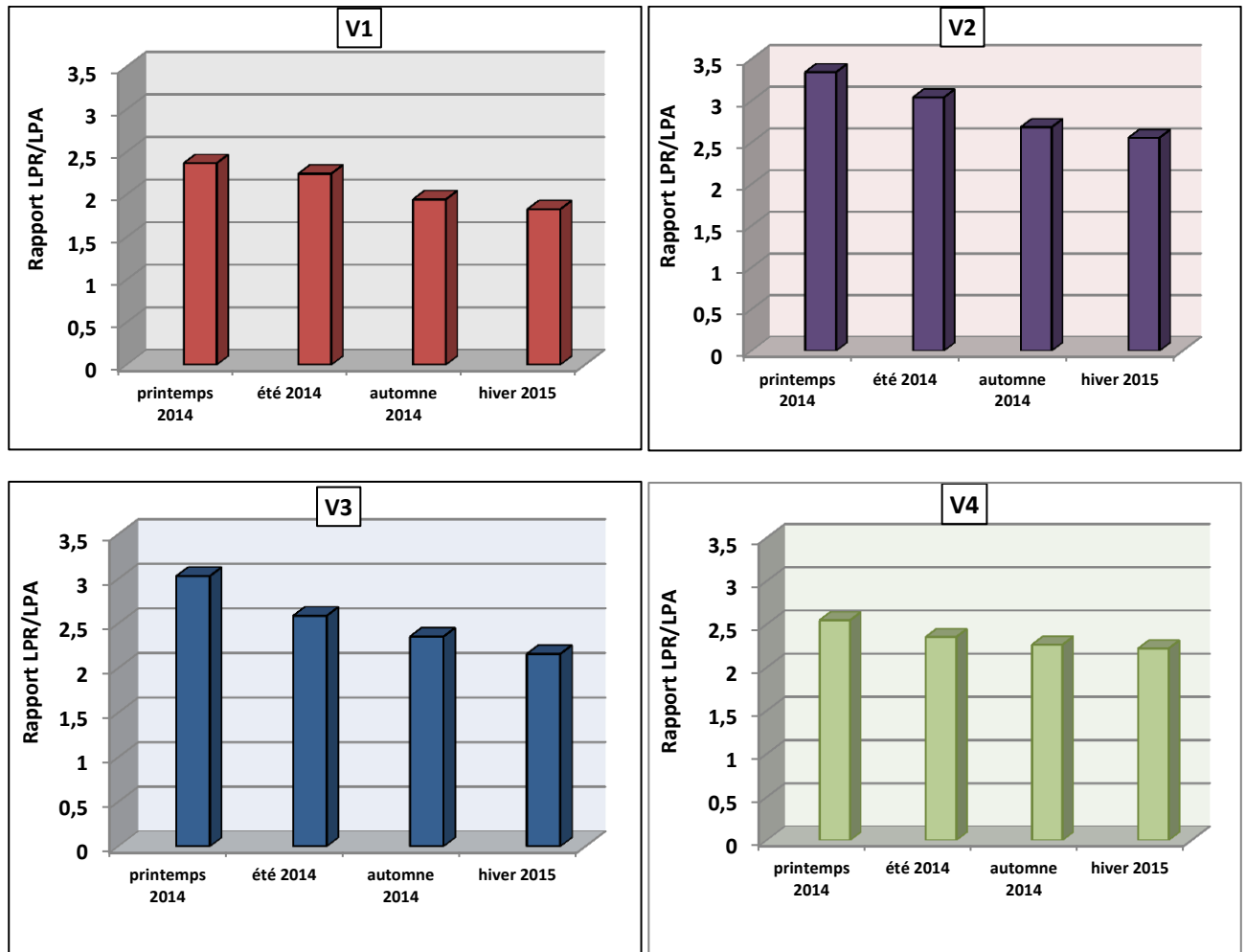


Figure 56. Variation saisonnière du rapport (LPR / LPA) des semis de pin pignon

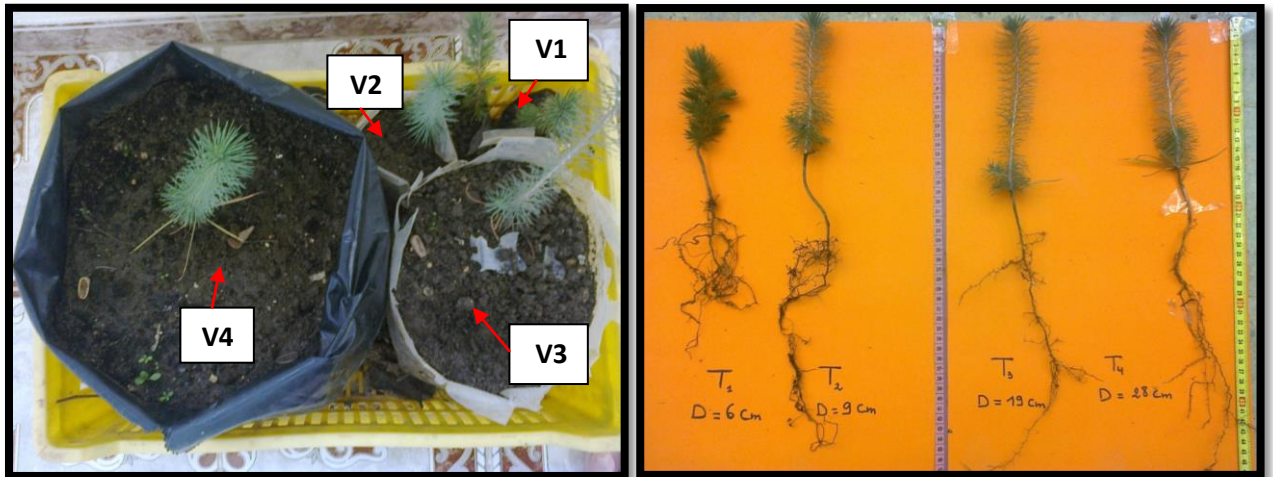


Photo 44. Semis de pin pignon dans les différents volumes de sol après une année de croissance (2015)

3.3.4. Poids frais et sec de la partie aérienne

❖ Poids frais

D'après la figure 57.a, le poids frais de la partie aérienne des semis de pin pignon possède une augmentation remarquable au cours des saisons.

La biomasse aérienne des semis durant la période printanière possède un taux d'augmentation plus élevé estimée à 38.70 % ; Cependant, les taux les plus faibles sont observées pendant la période hivernale (8.13 %), Alors que la période estivale et automnale présente des taux moyens (Fig 57,b). Ces valeurs représentent la moyenne de 03 plants.

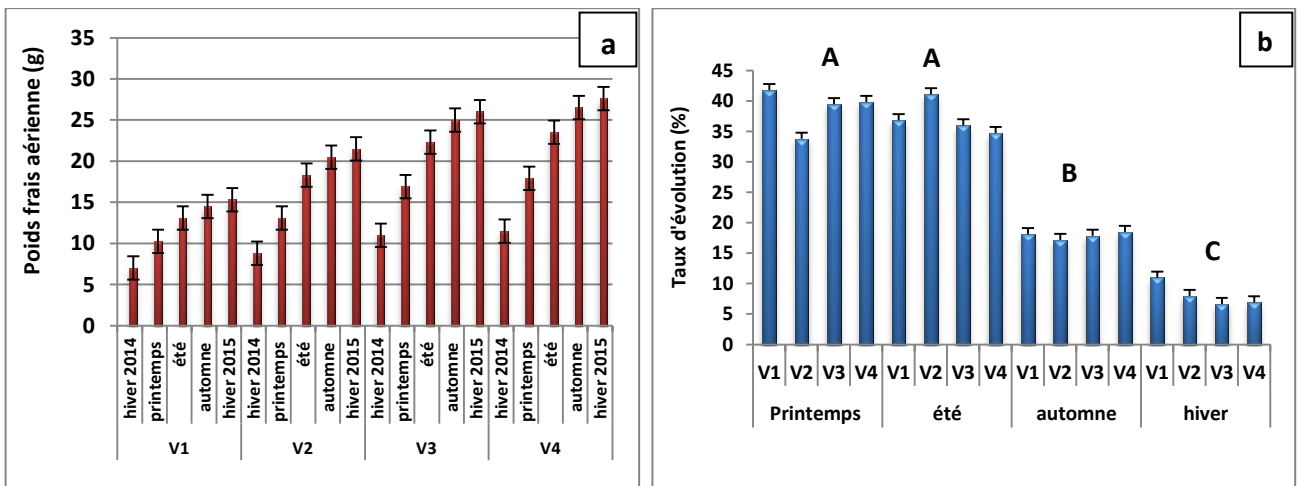


Figure 57. a: Variation du poids frais de la partie aérienne (g), b: taux d'évolution de la biomasse de poids frais (%), des jeunes plants de pin pignon durant l'année

En effet, l'analyse de la variance à un critère signale une différence très hautement significative en fonction des saisons ($p < 0.0001$). Le test de Newman et Keuls à 5%, fait ressortir trois groupes différents pour le poids frais, où on note que le taux d'évolution le plus élevé est observé au niveau de la saison printanière et estivale (groupe A), en suite la saison automnale avec un taux de croissance modéré (groupes B), en fin le quatrième groupe (C) caractérisant la saison hivernale avec le taux de croissance le plus faible (Annexe 6, Tableau 1).

❖ **Poids sec**

Les modifications enregistrées sur le poids sec de la partie aérienne des semis de pin pignon élevé en sachet de diamètre D6, D9, D19 et D28 et volume V1, V2, V3 et V4 sont variables suivant les saisons considérées (Fig 58). D'après la figure 58.a, le poids sec de la partie aérienne des semis accuse une augmentation remarquable au cours des saisons. D'après ces résultats, le taux d'évolution le plus élevée du poids sec des tiges est signalé durant le printemps, alors que la plus faible valeur est enregistrée durant la saison hivernale.

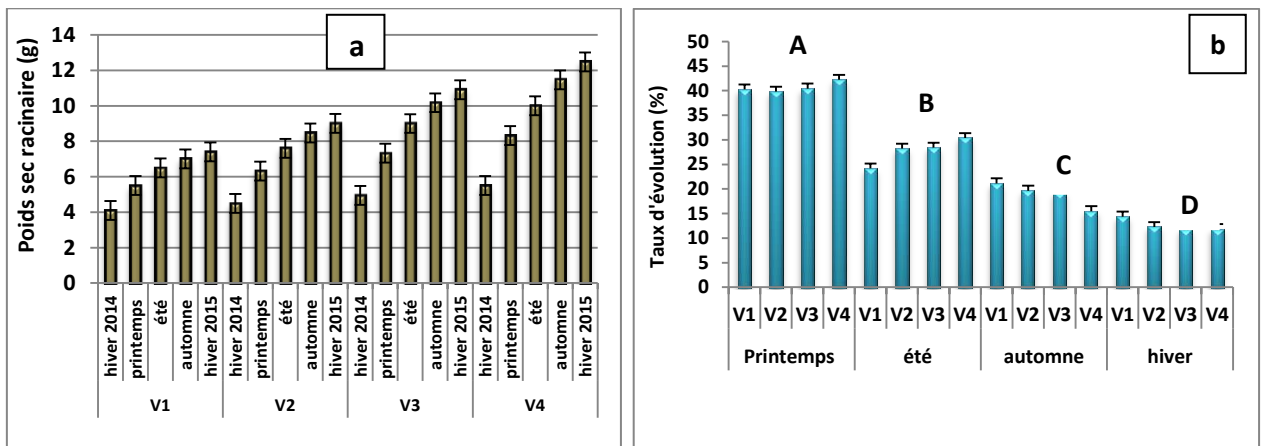


Figure 58. a: Variation du poids sec de la partie aérienne (g), b: taux d'évolution de la biomasse de poids sec (%), des jeunes plants de pin pignon durant l'année

L'analyse de la variance à deux critères de classification du poids frais et sec de la partie aérienne révèle des différences très hautement significatives entre les différentes saisons avec une probabilité ($p < 0.0001$).

L'analyse statistique révèle l'existence de quatre groupes homogènes pour le poids sec des tiges; le premier groupe (A) correspond à la saison printanière qui caractérisé la moyenne la plus élevée (40.697%), le dernier groupe (D) correspond à la saison d'hiver présentant la plus faible moyenne (12.565%) (Annexe 6, Tableau 1).

3.3.5. Poids frais et sec de la partie racinaire

❖ Poids frais

La variation du poids frais racinaire est illustrée dans la figure 59; Les fluctuations thermiques entre les saisons ont donné une augmentation du poids frais de la partie racinaire. Les semis de pin pignon présentent une forte évolution durant la saison printanière avec une valeur de 40.26%, la saison estivale présente le taux de croissance le plus faible (11.82%); Tandis que la saison automnale et hivernale accuse des taux de croissance moyens.

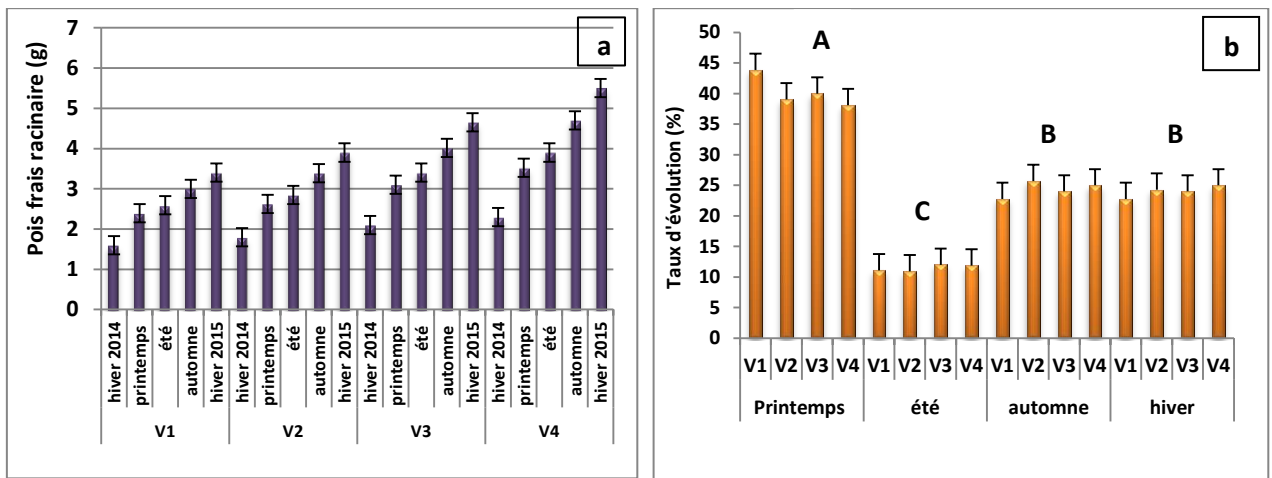


Figure 59. a: Variation du poids frais de la partie racinaire (g), b: taux d'évolution de la biomasse de poids frais (%), des jeunes plants de pin pignon durant l'année

Ces résultats sont évalués par l'analyse de la variance à un critère qui signale une différence très hautement significative en fonction des saisons ($p < 0.0001$). La comparaison des moyennes réalisées par le test de Newman et Keuls à 5 %, donne trois groupes différents pour le poids frais, où la saison printanière occupe le premier groupe avec le taux de croissance le plus élevé, et la saison estivale occupe le dernier groupe avec le taux de croissance le plus faible (Annexe 6, Tableau 1).

❖ Poids sec

Les variations du poids sec de la partie racinaire varient en fonction du temps. La période printanière possède une augmentation maximale estimée à $(1.802 \pm 0.12g)$ avec un taux de croissance plus élevé (41%), tandis que la période estivale possède la valeur minimale $(1.93 \pm 0.13g)$ avec un taux de croissance plus faible (10.13%).

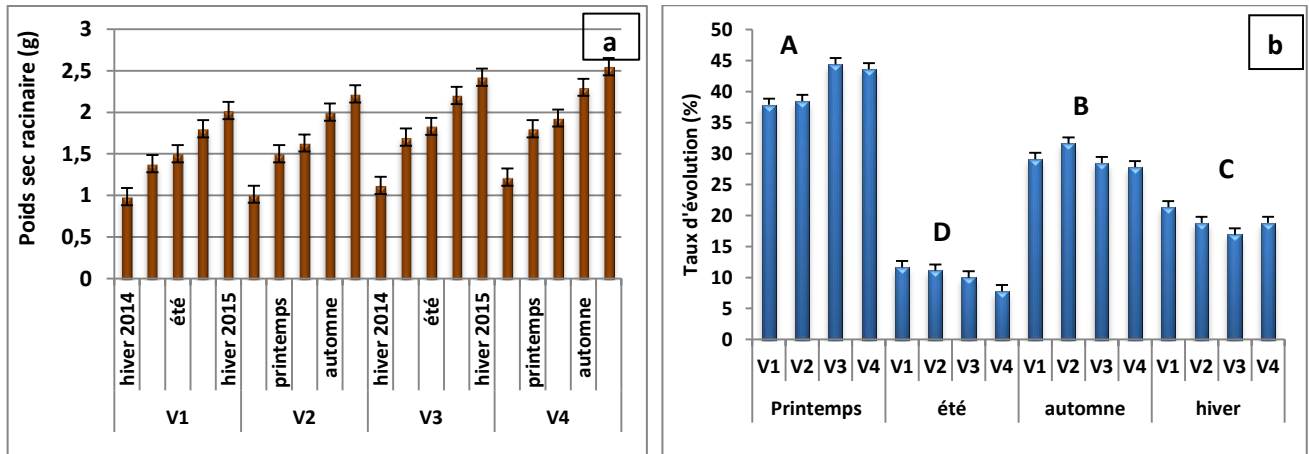


Figure 60. a: Variation du poids sec de la partie racinaire (g), b: taux d'évolution de la biomasse de poids sec (%), des jeunes plants de pin pignon en fonction des saisons

L'analyse de la variance est très hautement significative pour les différentes saisons ($p < 0.0001$). Le test de Newman-keuls classe les différentes saisons en trois groupes homogènes. Le premier groupe (A) correspond à la saison printanière avec la valeur maximale, le dernier groupe (D) dépend à la saison estivale avec la valeur minimale (Annexe 6, Tableau 1).

3.3.6. Rapport matière sèche partie racinaire/matière sèche partie aérienne

La figure 61 illustre les variations du rapport de biomasse sec des semis de pin pignon enregistrées durant les différentes saisons. On remarque que cette variation est régressive et présente des diminutions importantes entre la saison printanière et estivale.

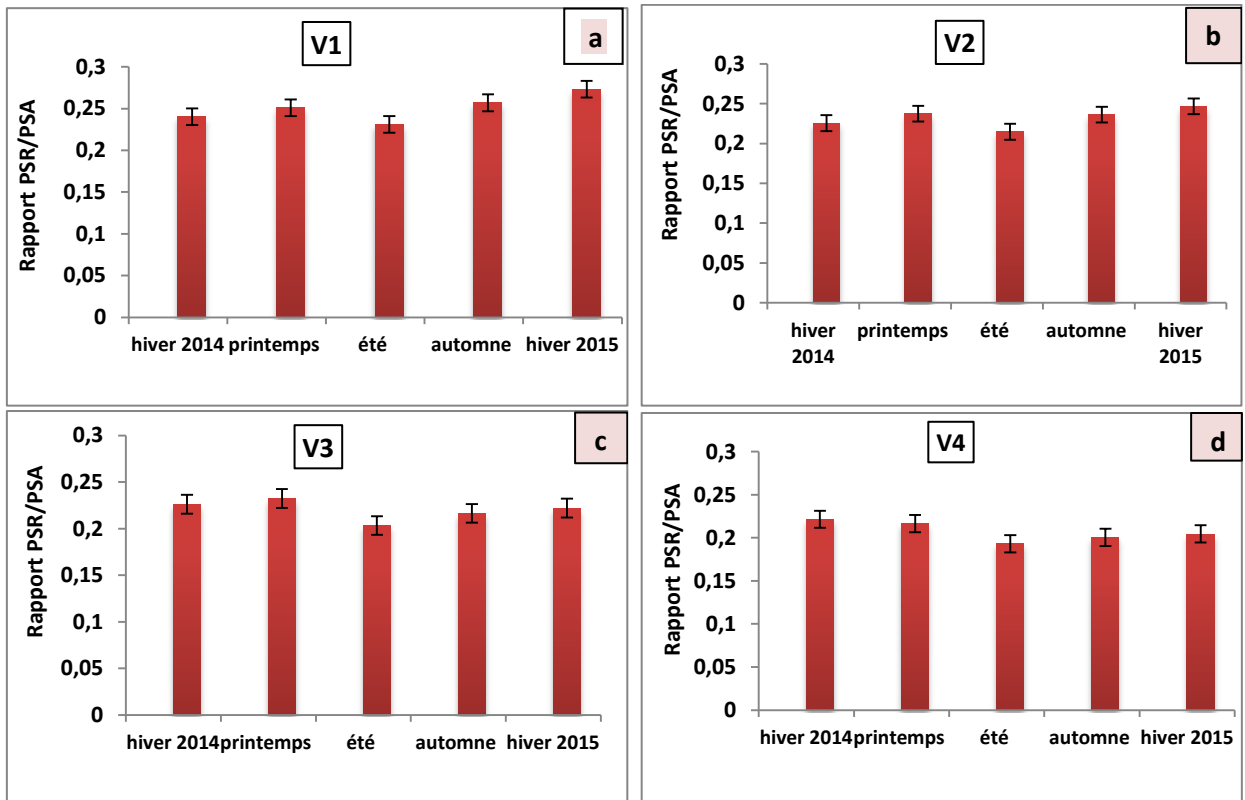


Figure 61. Variation saisonnière du rapport de poids sec (PSR/PSA) des semis de pin pignon

L'analyse de la variance montre qu'il n'existe pas de différence entre les saisons ($p= 0.966$) pour la figure (61.a), ($p= 0.970$) pour la figure (61.b), ($p= 0.940$) pour la figure (61.c), et ($p= 0.780$) pour la figure (61.d).

3.3.7. Corrélation entre les paramètres morphologiques

Cette matrice a pour objet de tester les liaisons qui peuvent exister entre les variables morphologiques.

- **Corrélation entre les paramètres morphologiques des semis de pin pignon (*Pinus pinea L.*) au cours de l'année pour le volume du sachet (V1)**

Tableau 41. Matrice de corrélation entre les variables morphologiques (V1)

variables	LPA	LPR	Rap (LR/LA)	PFA	PSA	PFR	PSR	Rap (PR/PA)
LPA	1	0.979	-0.987	0.983	0.979	0.978	0.986	0.658
LPR		1	-0.936	0.999	0.997	0.965	0.960	0.519
Rap (LR/LA)			1	-0.943	-0.940	-0.964	-0.982	-0.756
PFA				1	0.999	0.973	0.968	0.546
PSA					1	0.979	0.972	0.557
PFR						1	0.997	0.708
PSR							1	0.737
Rap (PR/PA)								1

LPA : longueur de la partie aérienne ; *LPR* : longueur de la partie racinaire ; *Rap (LR/LA)* : rapport (longueur racinaire/longueur aérienne) ; *PFA* : poids frais de la partie aérienne ; *PSA* : poids sec de la partie aérienne ; *PFR* : poids frais de la partie racinaire ; *PSR* : poids sec de la partie racinaire ; *Rap (PR/PA)* : rapport (poids racinaire/poids aérienne).

Au seuil de 5%, les valeurs des coefficients de corrélation (r) qui relient les différentes variables sont comprises entre 0.519 (p<0.05) et 0.999 (p<0.05) témoignant d'une corrélation significative et fortement positive entre les variables (Tab 41). La longueur de la tige est positivement corrélée à celle de la racine (r=0.979), au poids frais de la partie aérienne (r=0.983), poids sec racinaire (r=0.986) et le rapport (PR/PA) (r=0.658) et négativement corrélé à celle de rapport (LR/LA) (r= -0.987). Ainsi, la longueur racinaire est positivement corrélée au poids frais aérienne (r=0.999), poids sec aérien (r=0.997), poids frais et sec racinaire et le rapport (r=0.519) et négativement corrélé au rapport (LR/LA) (r=-0.936). le rapport (LR/LA) est négativement corrélé au poids frais et sec de la partie aérienne, et de poids frais et sec de la partie racinaire, aussi au rapport (PR/PA).

➤ **Corrélation entre les paramètres morphologiques des semis de pin pignon (*Pinus pinea*) au cours de l'année pour le volume du sachet (V2)**

Tableau 42. Matrice de corrélation entre les variables morphologiques (V2)

variables	LPA	LPR	Rap LR/LA	PFA	PSA	PFR	PSR	Rap PR/PA
LPA	1	0.982	-0.993	0.995	0.994	0.974	0.976	-0.458
LPR		1	-0.954	0.995	0.992	0.944	0.957	-0.537
Rap LR/LA			1	0.977	-0.979	-0.975	-0.974	0.390
PFA				1	0.994	0.954	0.963	-0.525
PSA					1	0.977	0.985	-0.441
PFR						1	0.996	-0.260
PSR							1	-0.278
Rap PR/PA								1

LPA : longueur de la partie aérienne ; *LPR* : longueur de la partie racinaire ; *Rap (LR/LA)* : rapport (longueur racinaire/longueur aérienne) ; *PFA* : poids frais de la partie aérienne ; *PSA* : poids sec de la partie aérienne ; *PFR* : poids frais de la partie racinaire ; *PSR* : poids sec de la partie racinaire ; *Rap (PR/PA)* : rapport (poids racinaire/poids aérienne)

D'après les résultats et au seuil de 5%, les variations du rapport (longueur des racines/longueur des tiges) sont négativement corrélées avec la longueur de la partie aérienne ($r = -0.993$) et la longueur de la partie racinaire ($r = -0,954$), poids sec aérienne ($r = -0,979$), poids frais racinaire ($r = -0,975$) et poids sec racinaire ($r = -0,974$), et positivement avec le poids frais de la partie aérienne ($r = 0.977$). Ainsi, le poids frais des tiges est positivement corrélés avec le poids sec des tiges ($r = 0.994$), de poids frais des racines ($r = 0.954$) et le poids sec des racines ($r = 0.963$). Le poids frais des racines a une très forte corrélation positive avec le poids sec ($r = 0.996$).

➤ **Corrélation entre les paramètres morphologiques des semis de Pin pignon (*Pinus pinea*) au cours de l'année pour le volume du sachet (V3)**

Tableau 43. Matrice de corrélation entre les variables morphologiques (V3)

variables	LPA	LPR	Rap LR/LA	PFA	PSA	PFR	PSR	Rap PR/PA
LPA	1	0.978	-0.998	0.993	0.995	0,972	0,972	-0,479
LPR		1	-0,965	-0.985	-0.988	-0,970	0,953	-0,537
Rap LR/LA			1	-0.985	-0.988	-0,970	-0,966	0,472
PFA				1	0.997	0,960	0,969	-0.502
PSA					1	0.980	0,985	-0.437
PFR						1	0,996	-0.270
PSR							1	-278
Rap PR/PA								1

LPA : longueur de la partie aérienne ; *LPR* : longueur de la partie racinaire ; *Rap (LR/LA)* : rapport (longueur racinaire/longueur aérienne) ; *PFA* : poids frais de la partie aérienne ; *PSA* : poids sec de la partie aérienne ; *PFR* : poids frais de la partie racinaire ; *PSR* : poids sec de la partie racinaire ; *Rap (PR/PA)* : rapport (poids racinaire/poids aérienne).

Au seuil de 5%, la longueur des tiges et des racines est négativement corrélée au rapport (LR/LA) ($r = -0.998$), ($r = -0.965$), et positivement avec le poids frais des tiges ($r = 0.993$), le poids sec des tiges ($r = 0,995$), le poids frais et sec des racines ($r = 0.972$).

Ainsi, le rapport (LR/LA) est négativement corrélés avec le poids frais et sec des tiges ($r = -0.985$), ($r = -0.988$) et le poids frais et sec des racines ($r = -0,970$) ($r = -0.966$).

En effet, une corrélation positive de l'ordre de ($r = 0.996$) et respectivement observée entre le poids sec et le poids frais des racines d'une part et de ($r = 0.985$) entre le poids sec des racines et des tiges d'autre part.

➤ **Corrélation entre les paramètres morphologiques des semis de pin pignon (*Pinus pinea*) au cours de l'année pour le volume du sachet (V4)**

Tableau 44. Matrice de corrélation entre les variables morphologiques (V4)

variables	LPA	LPR	Rap LR/LA	PFA	PSA	PFR	PSR	Rap PR/PA
LPA	1	0.997	-0.999	0.999	0.993	0.962	0.967	-0.824
LPR		1	-0.995	0.998	0.989	0.953	0.961	-0.838
Rap LR/LA			1	0.998	-0.992	-0.961	-0.965	0.822
PFA				1	0.994	0.961	0.969	-0.818
PSA					1	0.986	0.990	-0.753
PFR						1	0.997	-0.642
PSR							1	-0.656
Rap PR/PA								1

LPA : longueur de la partie aérienne ; *LPR* : longueur de la partie racinaire ; *Rap (LR/LA)* : rapport (longueur racinaire/longueur aérienne) ; *PFA* : poids frais de la partie aérienne ; *PSA* : poids sec de la partie aérienne ; *PFR* : poids frais de la partie racinaire ; *PSR* : poids sec de la partie racinaire ; *Rap (PR/PA)* : rapport (poids racinaire/poids aérienne).

La longueur des tiges et des racines sont négativement corrélées au rapport (LR/LA) ($r = -0.999$), ($r = -0.995$), et positivement avec le poids frais des tiges ($r = 0.999$), ($r = 0.998$), le poids sec des tiges ($r = 0.993$), ($r = 0.989$) et le poids frais et sec des racines ($r = 0.962$), ($r = 0.953$) et ($r = 0.967$), ($r = 0.961$) respectivement Au seuil de 5%.

3.4. Discussion

Pour mettre en évidence les potentialités d'adaptation du pin pignon aux contraintes thermiques, deux expérimentations ont été réalisées sur les semis, l'une par l'application des traitements thermiques de hautes et de basses températures, l'autre par le suivi de sa réponse éco-physiologique aux variations saisonnières dans la région de Constantine et dans un climat semi-aride.

On a noté des variations des paramètres liés au phénomène de croissance chez les jeunes plants de Pin pignon, on a enregistré le dégagement de quatre périodes de croissance ; Une période hivernale à croissance très faible (la dormance automno-hivernale) due aux basses températures au niveau du sol. Une deuxième période printanière caractérisée par une croissance maximale des jeunes plants à cause des conditions du milieu (température très favorable et disponibilité de l'eau), une troisième période estivale caractérisée par une croissance très faible due à l'insuffisance de la disponibilité de l'eau qui limite la croissance des racines. Et une période automnale, où la croissance est relativement importante à cause de la disponibilité de l'eau.

En effet, le taux de croissance aérienne et racinaire est respectivement de l'ordre de 14% et 7.68% pour les semis durant la saison hivernale. Ces résultats montrent que les parties aériennes et racinaires sont plus sensibles sous l'effet des basses températures hivernales. Ceci a été démontré par des études réalisées sur le pin d'Alep par Abed, (1992) et Chaba, (1991) in Bezzala, (2005) dans la région d'Alger et Djelfa qui ont mis en évidence une croissance faible à nulle de cette espèce durant la période hivernale du fait des basses températures à la surface du sol.

Ainsi, Guyon (1986) a étudié l'influence du climat sur l'expression des composantes de la croissance en hauteur chez le pin noir (*Pinus nigra*). Les résultats obtenus montrent que les plus faibles élongations moyennes des entre-noeuds correspondent aux températures minimales les plus faibles. Le même auteur a signalé que les deux paramètres climatiques affectant généralement la croissance en hauteur de la plupart des conifères sont les facteurs hydrique et thermique.

Durant la saison printanière, on a enregistré une croissance maximale au niveau des parties aériennes et souterraines que ce soit pour la hauteur ou la biomasse. Les résultats de ces mesures sont en accord avec la tendance généralement recensée dans la littérature. La saison printanière est la saison la mieux caractérisée au développement des plants indiqués par des températures favorables. Tandis que la baisse de ces dernières durant la saison hivernale provoque une inhibition de croissance chez la plupart des plantes.

González et al. (2005) montre qu'avec l'augmentation de la température, la vitesse de développement augmente en période de croissance et diminue en période de repos hivernal. Les travaux de Mauriès (1998) sur la luzerne font référence à des relations observées entre l'augmentation de la température (>5°C) et le repart de la végétation durant la saison printanière. La racine pivotante de la luzerne développe des racines secondaires plus ou moins ramifiées et l'ensemble possède une forte capacité d'enracinement (jusqu'à 10 m).

Mis à part les différences d'âge et de développement, ce comportement est similaire à celui décrit pour le désordre physiologique connu sous le nom de *choking* (Daniells, 1993 in González et al. 2005). Selon Bates et al. (1973) in González et al. (2005) ; nombre de feuilles nécrosées ; poids frais des plantes ; nombre de racines ; nombre de feuilles et hauteur des plantes. Ces dernières estimations ont été affectées à la fin de la période d'acclimatation.

La diminution de croissance est liée aux changements métaboliques codés par la variation génétique des espèces et par le type et l'intensité du stress. En condition stressée, la baisse de la croissance semble se faire via une diminution de l'élongation cellulaire

(Diminution de 53% de l'accumulation d'actine) (Dubos et Plomion, 2001). Comme cela a été mis en évidence par Costa, (1999). Ces résultats sont en accord avec les mesures de croissance réalisées par Nguyen-Queyrens et al. (1995). Liu et al. (1998) in Cornic, (2007), ont observé une baisse de la quantité de cytokinines chez *Pinus sylvestris*, *Pinus koraiensis* ou *Abies holophylla* lors d'un stress salin.

Durant la période où les plantes sont exposées à des températures basses, les acides gras des membranes sont désaturés. Lorsque leur degré d'insaturation devient suffisant, les cellules reprennent leur croissance et la synthèse des acides gras redémarre. Si par contre la température de culture est augmentée, leur degré d'insaturation diminue parce qu'il n'y a plus de désaturation des lipides existants et parce qu'il se produit une synthèse rapide d'acides gras saturés (Cornic, 2007).

D'anciens travaux, réalisés sur des plantes pérennes du Mohave et des zones sèches australiennes, rapportés par Berry et Björkman, (1980) in Cornic, (2007), indiquent en effet que l'augmentation de la température de croissance est corrélée à un accroissement du degré de saturation des lipides.

Le taux d'accumulation du poids sec est plus important durant la saison printanière au niveau des racines (41%) et la partie aérienne (40.69%). Tandis que les saisons automnales et estivales ont enregistré des taux moyennement modérés qui sont de l'ordre de 29.25% et 10.13% respectivement au niveau des racines et 18.91% et 12.56% au niveau des parties aériennes.

L'analyse de la matrice de corrélation confirme nos résultats, car une corrélation positive très hautement significative a été tirée entre la hauteur de la partie aérienne et la longueur de la partie souterraine dans les différents volumes (V1 ; $r=0.979$), (V2 ; $r=0.982$), (V3 ; $r=0.978$), (V4 ; $r=0.997$) de même que pour le poids frais de la partie aérienne et souterraine.

A la fin de l'expérimentation, les longueurs cumulées des tiges et des racines des semis de Pin pignon sont respectivement de 20.5cm et 45.5cm. Ceci suggère que dans les conditions de développement naturelles, les écarts de températures saisonnières affectent la croissance en hauteur de la partie aérienne par rapport à la partie souterraine.

Des résultats analogues ont été présentés par plusieurs auteurs qui ont signalés une réduction plus marquée de la croissance en hauteur au niveau des parties aériennes qu'au niveau des parties racinaire chez le genre *Pinus* suite aux différents stress ; chez le *Pinus caribaea* (63%) et le *Pinus occarpa* suite à un stress hydrique, le Pin maritime suite à un stress

salin (Costa, 1999 ; Nguyen-Queyrens et al. 1995). Cette plasticité morphologique devrait permettre aux pins d'acquérir plus efficacement l'eau et l'azote du sol (Cochard et al. 2003).

Le taux d'accumulation de la biomasse souterraine soumise aux conditions naturelles a été réduit par rapport à celle de la partie aérienne. En effet, le poids sec de la partie aérienne et la partie souterraine à la fin de l'essai, est respectivement de l'ordre de 12.47 et 2.55g dans les sachets de volume V4, et le rapport de la biomasse n'a pas été affecté (il n'existe pas des corrélations significatives entre le rapport biomasse souterraine et aérienne et les autres paramètres morphologiques). Cependant, la longueur de la partie racinaire est plus importante que la partie aérienne, les semis de pin pignon forment des racines fines et longues. Cette différence semble liée à l'implication des racines dans l'assimilation en eau, car le maintien d'une certaine activité cellulaire va permettre aux plantes de prospector le milieu pour la recherche d'eau.

Nos résultats ne correspondent pas à la tendance observée dans la littérature voulant que les plants stressés exposent les plus fortes accumulations de la biomasse dans la partie racinaire. Albouchi et al. (2001) in Bezzala, (2005), constatent une réduction de la biomasse sèche totale et une allocation de biomasse vers les racines des jeunes plants de Casuarina, suite à un stress hydrique.

L'adaptation de la partie aérienne (hauteur de la tige, nombre des feuilles, croissance radiale et biomasse aérienne) varie selon l'espèce et l'intensité du stress hydrique subi (Bezzala, 2005). La distribution de la biomasse est affectée suite à un stress hydrique chez les plantes stressées, liée à la complémentarité des fonctions de croissance des parties racinaires et aériennes (Ledig, 1981).

Les Pins sont des espèces polycycliques qui présentent donc deux pousses annuelles. La croissance dépendant de processus biologiques complexes comme la photosynthèse, la migration des sucres, les mouvements de l'eau dans le tronc (Poupon, 1970).

Le Pin pignon supporte beaucoup plus mal les conditions climatiques hivernales. Sa mortalité est élevée durant cette saison. Cependant il réagit bien l'élévation des températures estivales puisqu'il s'allonge bien au cours de l'été, à une période où les températures ont dépassé le seuil de 35°C. En général, il est très bien adapté à la région de Constantine et résiste beaucoup aux conditions climatiques estivales.

4. Réponses physiologiques du pin pignon aux stress thermique, hydrique et combiné

4.1. Stress thermique aux températures extrême

4.1.1. Hautes Températures

Dans cette étude, il nous a paru intéressant d'élucider quels sont les effets de hautes températures sur l'adaptation du pin pignon (*Pinus pinea*). Nous nous sommes intéressés aux marqueurs biochimiques tels que la chlorophylle, les sucres solubles, la proline, les protéines, les enzymes (Catalase, Peroxydase et Malonedialdéhyde).

4.1.1.1. Chlorophylle

➤ La Chlorophylle (a) et (b)

La chlorophylle est très instable et se décompose facilement sous l'effet de la lumière et d'autres facteurs environnementaux comme la température.

Les résultats obtenus des chlorophylles (a) et (b) dans les aiguilles de pin pignon stressées par des hautes températures comprises entre 38°C et 50°C sont illustrées dans la figure 62. Ces résultats montrent que la chlorophylle (a) présente des valeurs plus élevées par rapport à celles de la chlorophylle (b). Les hautes températures induisent une diminution de la chlorophylle (a) à partir de 38°C. Cette diminution atteint son maximum à 50°C (33.13%). Concernant la chlorophylle (b), les résultats varient de la même tendance que ceux de la chlorophylle (a), avec une diminution significative à 50°C de 33.23%.

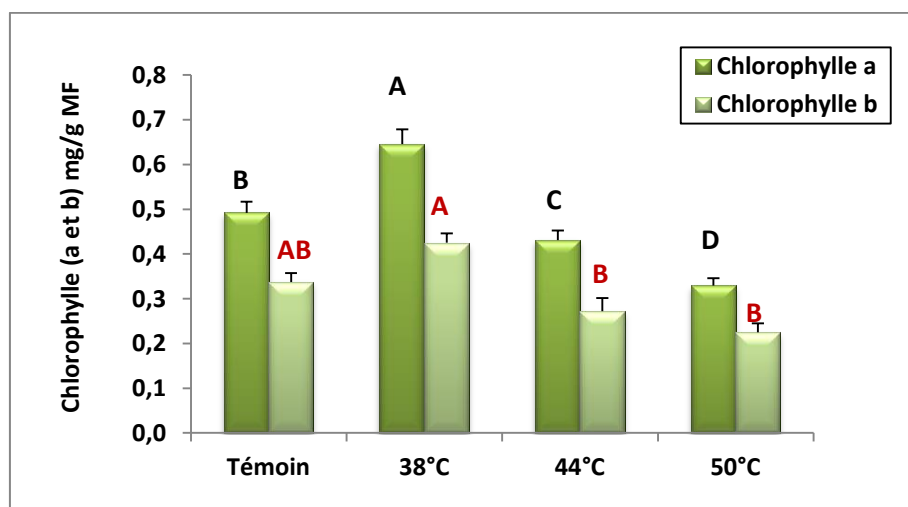


Figure 62. Taux de chlorophylle (a et b) des aiguilles de pin Pignon

Le classement des traitements thermiques en fonction de la teneur en chlorophylle (a) et (b) s'établit pour les aiguilles selon la séquence suivante :

$$[38^{\circ}\text{C}] > [\text{Témoins}] > [44^{\circ}\text{C}] > [50^{\circ}\text{C}]$$

Une différence très hautement significative entre les températures est observée et confirmée par l'analyse de la variance à un critère de classification ($p < 0.0001$) pour la chlorophylle (a) et la chlorophylle (b) (Annexe 7, Tableau 1). La comparaison des moyennes à l'aide de test de Newman et Keuls à 5% fait sortir quatre groupes homogènes A, B, C et D pour la chlorophylle (a). Le premier groupe correspond la température 38°C avec la moyenne élevée 0.646 $\mu\text{mol}/\text{mg}$ MF, et le dernier groupe comprend la température 50°C avec la moyenne faible 0.329 $\mu\text{mol}/\text{mg}$ MF.

Pour la chlorophylle (b), le test de Newman et Keuls à 5% fait sortir trois groupes homogènes, le premier groupe caractérisé par la température 38°C avec la plus forte moyenne, le dernier groupe regroupe les températures 44°C et 50°C avec la plus petite moyenne.

➤ **Le rapport ch.a / ch.b**

Les résultats présentés sur la figure 63, montrent les variations du rapport ch.a/ch.b en fonction des traitements thermiques. Ce rapport varie entre 1.462 pour le témoin à 1.585 à 44°C.

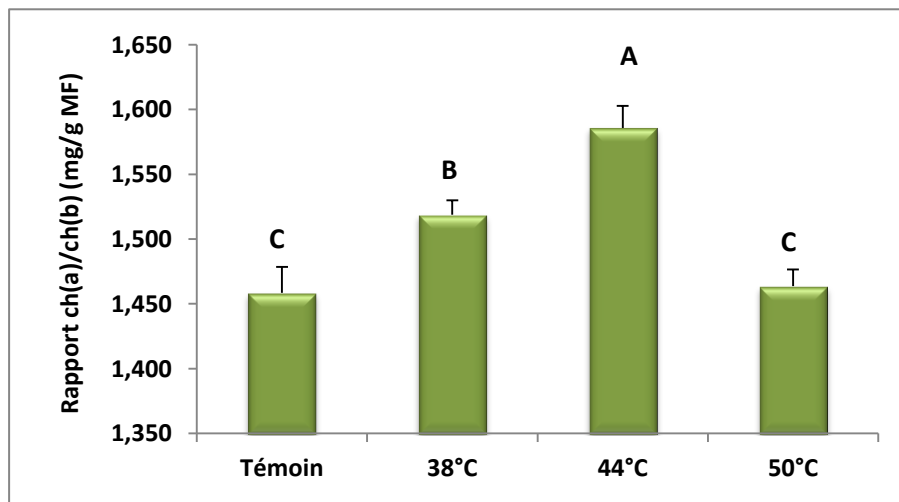


Figure 63. Variation du rapport de chlorophylles des aiguilles de pin pignon

Le classement des traitements thermiques en fonction de la teneur en chlorophylle (a /b) suit la séquence suivante :

$$[44^{\circ}\text{C}] > [38^{\circ}\text{C}] > [50^{\circ}\text{C}] > [\text{Témoïn}]$$

L'analyse de la variance révèle qu'il existe des différences très significatives entre les différentes températures (Annexe 7, Tableau 1). Les résultats de l'analyse statistique révèlent l'existence de trois groupes homogènes où le premier groupe (A) correspond à la température 44°C avec la plus forte moyenne (1.585), le second (B) comprend la température 38°C, viennent ensuite la température 50°C et le témoin en dernier groupe (C) avec les plus petites moyennes.

4.1.1.2. Sucres solubles

Les résultats illustrés dans la figure 64 montrent des variations importantes dans l'accumulation des sucres solubles au niveau des différents organes en fonction des températures chaudes. La température 50°C enregistre les teneurs les plus élevées par rapport aux températures 38°C et 44°C avec des taux d'augmentation allant de 273% au niveau des feuilles à 306% au niveau des tiges et à 451% au niveau des racines comparativement au témoin.

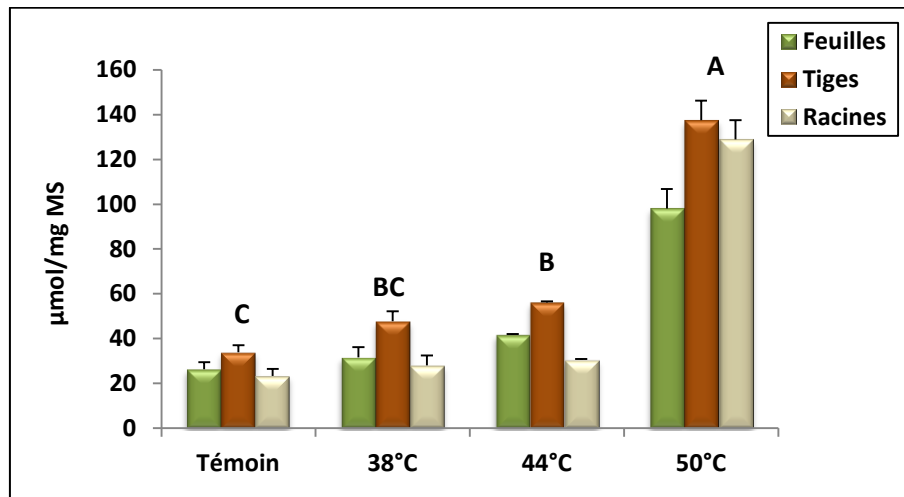


Figure 64. Teneurs en sucres solubles dans les différents organes des semis de pin pignon

Le classement des traitements thermiques en fonction de la teneur en sucres solubles suit la séquence suivante :

$$[50^{\circ}\text{C}] > [44^{\circ}\text{C}] > [38] > [\text{Témoïn}]$$

Tableau 45. Taux de variation des teneurs en sucres solubles pour les températures chaudes

	Témoin	38°C	44°C	50°C
Aiguilles	26.260	31.683	41.657	98.109
Tiges	33.874	47.776	56.250	137.548
Racines	23.356	28.064	30.489	128.903

L'analyse de la variance à un critère de classification signale des différences très hautement significatives entre les températures ($p < 0.0001$) (Annexe 7, Tableau 1). Le test de Newman et Keuls révèle l'existence de cinq groupes homogènes, le premier correspond à 50°C avec la moyenne la plus élevée (121.520 $\mu\text{mol}/\text{mg}$), le second correspond à 44°C, le troisième à 38°C. Alors que le dernier groupe correspond au témoin (25°C).

4.1.1.3. Proline

Au cours du stress aux hautes températures, l'accumulation de la proline est différente au niveau des organes et en fonction des températures. De ce fait les teneurs les plus élevées sont enregistrées pour la température 50°C, alors que les teneurs les plus faibles sont observées à la température 38°C.

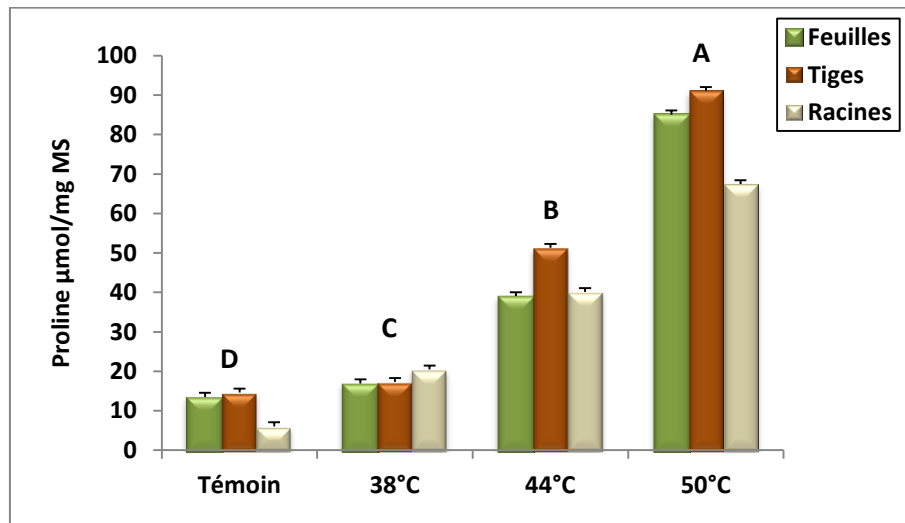


Figure 65. Teneurs en proline dans les différents organes des semis de pin pignon

Le classement des traitements thermiques en fonction de la teneur en proline suit la séquence suivante :

$$[50^\circ\text{C}] > [44^\circ\text{C}] > [38] > [\text{Témoin}]$$

Tableau 46. Taux de variation des teneurs en proline pour les hautes températures

	Témoin	38°C	44°C	50°C
Aiguilles	13.521	16.925	39.033	85.079
Tiges	14.641	17.324	51.316	91.066
Racine	6.049	20.436	40.078	67.419

L'analyse de la variance à un critère de classification signale des différences très hautement significatives entre les températures ($p < 0.0001$) (Annexe 7, Tableau 1). L'analyse statistique par le test de Newman et Keuls au seuil de 5% révèle l'existence de quatre groupes homogènes, le premier comprend la température 50°C avec la plus forte moyenne ($81.188 \mu\text{mol/MS}$), le deuxième groupe comprend la température 44°C, la troisième correspond à la température 38°C, alors que le dernier groupe correspond au témoin (25°C) avec la plus faible moyenne ($11.253 \mu\text{mol/mg MS}$).

4.1.1.4. Protéines

Les mesures obtenues des protéines au niveau des différents organes des semis stressés montrent des variations en fonction de la température (Fig 66). Les plus grandes valeurs sont enregistrées à 50°C avec une concentration de (1.205 mg/g MF) et les accumulations les plus faibles sont enregistrées pour le témoin (0.624 mg/g MF).

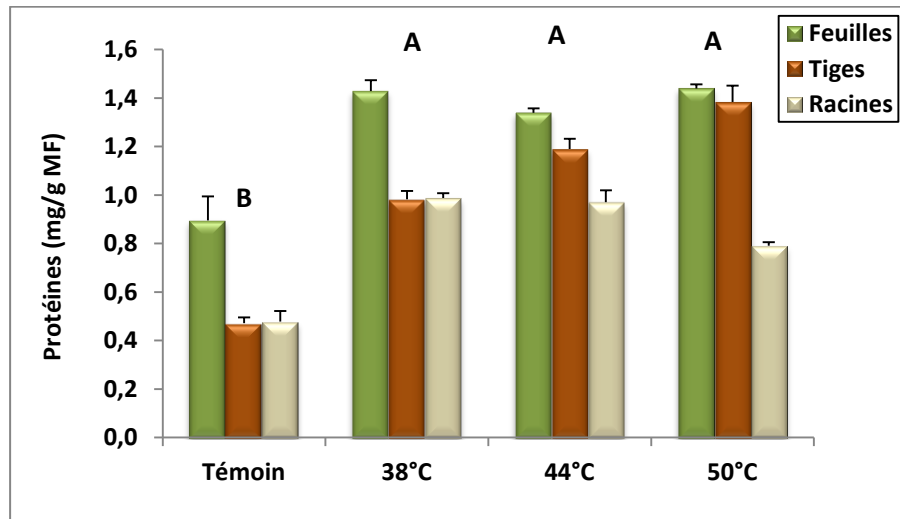


Figure 66. Teneurs en protéines dans les différents organes des semis de pin pignon

Selon la figure 66, les teneurs en protéines au niveau de la plante décroissent dans l'ordre suivant :

$$[50^{\circ}\text{C}] > [44^{\circ}\text{C}] > [38^{\circ}\text{C}] > [\text{Témoin}]$$

Tableau 47. Taux de variation des teneurs en protéine pour les hautes températures

	Témoin	38°C	44°C	50°C
Aiguilles	0.896	1.429	1.339	1.439
Tiges	0.471	0.982	1.190	1.384
Racine	0.478	0.988	0.971	0.792

L'analyse de la variance montre qu'il existe une différence très significative en fonction des traitements ($p < 0.0001$) (Annexe 7, Tableau 1). L'analyse statistique, montre l'existence de deux groupes ; le premier groupe correspond aux températures 50°C, 44°C et 38°C avec les moyennes les plus élevées et le deuxième groupe comprend au témoin avec la plus faible moyenne.

4.1.1.5. Catalase et activité spécifique de la catalase

La catalase est une enzyme permettant la transformation de l'eau oxygénée (H_2O_2) en eau (H_2O) et dioxygène (O_2).

Les mesures obtenues indiquent que les teneurs en catalase et l'activité spécifique sont inférieures par rapport au témoin, où la plus grande valeur est obtenue à 38°C (14.796 U/g/mn), (48.450%) et la plus faible moyenne est obtenue à 50°C (11.664 U/g/mn), (61.788%).

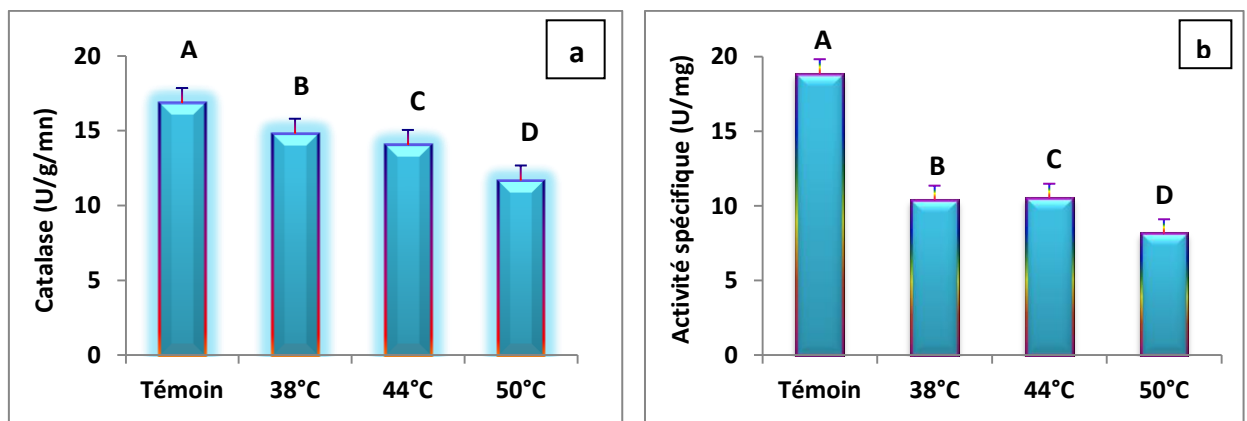


Figure 67. a : Teneurs en catalase, **b :** activité spécifique de la catalase au niveau des aiguilles du pin pignon

Le classement des traitements thermiques en fonction de la teneur en catalase et de l'activité spécifique de la catalase s'établit comme suit :

$$[\text{Témoïn}] > [38^{\circ}\text{C}] > [44^{\circ}\text{C}] > [50^{\circ}\text{C}]$$

Les résultats de l'analyse de la variance révèlent des différences très significatives entre les différents traitements thermiques (Annexe 7, Tableau 1). L'analyse statistique montre l'existence de quatre groupes ; le premier groupe correspond au témoin avec les moyennes les plus élevée, le dernier groupe comprend à la température 50°C avec les plus faible moyennes (11.664 U/g/mn).

4.1.1.6. Peroxydase et activité spécifique de la peroxydase

Les peroxydases sont des enzymes synthétisées par les plantes et appartiennent à une famille hétérogène. Le dosage de l'activité des peroxydases a été réalisée dans les aiguilles de jeunes plants soumis aux hautes températures. L'évolution de l'activité de la peroxydase en réponse à la température est illustrée dans la figure 68.a.

Chez le pin pignon, le stress thermique a provoqué une intensification de l'activité des peroxydases dans les aiguilles. Les taux d'augmentation variant de 59.183% du traitement 44°C à 83.673% au traitement 38°C. L'activité spécifique ne tiendra pas compte de la quantité d'enzymes présentes dans le milieu mais plutôt de l'intensité de cette activité sous stress. Dans les conditions normales (absence de stress), l'activité des peroxydases est pratiquement forte (Fig 68, b). Chez le Pin pignon, la variation de l'intensité enzymatique par rapport au témoin est respectivement comprise entre 14.883% à 44°C et 64.735% 50°C.

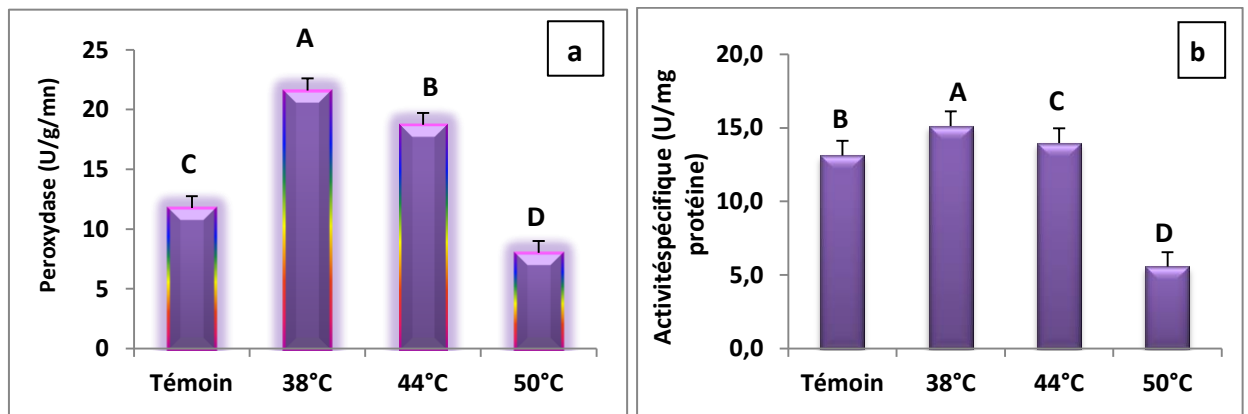


Figure 68. a: Teneurs en peroxydase, b: activité spécifique de peroxydase au niveau des aiguilles du pin pignon

Le classement des traitements thermiques en fonction de la teneur en peroxydase s'établit selon la séquence suivante :

$$[38^{\circ}\text{C}] > [44^{\circ}\text{C}] > [\text{Témoin}] > [50^{\circ}\text{C}]$$

Le classement des traitements thermiques en fonction de l'activité spécifique de peroxydase suit la séquence suivante :

$$[38^{\circ}\text{C}] > [\text{Témoin}] > [44^{\circ}\text{C}] > [50^{\circ}\text{C}]$$

L'analyse de la variance montre qu'il existe une différence très significative en fonction de la température ($p < 0.0001$) (Annexe 7, Tableau 1). Le test de Newman et keuls fait ressortir quatre groupements homogènes pour la teneur en peroxydase et l'activité spécifique de peroxydase, le groupe (A) est représenté par le traitement 38°C, qui reflète les moyennes les plus fortes. Le groupe (D) est représenté par le traitement 50°C avec les plus petites moyennes.

4.1.1.7. Malonedialdéhyde (MDA)

Les résultats des teneurs en MDA chez les aiguilles des semis de pin pignon durant le stress à la température chaude illustrées dans la figure 69, montrent des variations importantes. Les teneurs les plus élevées sont signalées pour le témoin, alors que la température 50°C présente la teneur la plus faible.

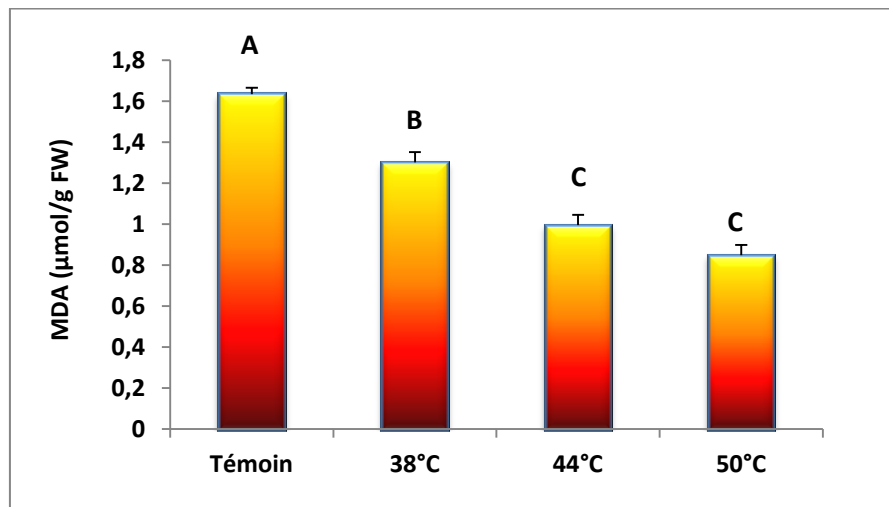


Figure 69. Teneur en MDA au niveau des aiguilles du pin pignon

Le classement des traitements thermiques en fonction de la teneur en MDA suit la séquence suivante :

$$[\text{Témoïn}] > [38^{\circ}\text{C}] > [44^{\circ}\text{C}] > [50^{\circ}\text{C}]$$

L'analyse de la variance révèle qu'il existe des différences très significatives entre les différentes températures (Annexe 7, Tableau 1). Le test de Newman et Keuls fait ressortir trois groupements homogènes (A), (B) et (C) ; le groupe (A) est représenté par le témoin, qui reflète la moyenne la plus forte. Le groupe (C) est représenté par les températures 44°C et 50°C avec les plus petites moyennes.

4.1.1.8. Corrélation entre les variables étudiées

Tableau 48. Matrice de corrélation des principaux paramètres biochimiques mesurés

variable	Chl.a	Chl.b	Chl.t	Ch.a/b	Sucres	Proline	Protéine	CAT	PX	MDA
Chl.a	1	0.992	0.632	0.171	-0.746	-0.825	-0.192	0.616	0.777	0.614
Chl.b		1	0.573	0.046	-0.723	-0.838	-0.273	0.647	0.691	0.677
Chl.t			1	0.622	-0.950	-0.804	-0.314	0.742	0.772	0.529
ch.a/b				1	-0.354	-0.067	0.494	-0.062	0.748	-0.335
Sucres					1	0.948	0.535	-0.901	-0.674	-0.762
Proline						1	0.659	-0.952	-0.550	-0.905
Protéine							1	-0.842	0.250	-0.892
CAT								1	0.312	0.955
PX									1	0.147
MDA										1

Ch.a : Chlorophylle a ; *Ch.b* : Chlorophylle b ; *Ch.t* : Chlorophylle totale ; *Ch.a/b* : Rapport ch.a/ch.b ; *CAT* : Catalases ; *PX* : Peroxydas ; *MDA* : Malonediaaldéhyde.

Au seuil de 5%, les teneurs en peroxydases après les traitements thermiques à haute température sont négativement corrélées à la proline (r = -0.550), des sucres solubles (r = -0.674), et positivement avec la chlorophylle totale (r = 0.772) et le rapport chl.a/chl.b.

Ainsi, les quantités de la catalase sont négativement corrélées avec celles des sucres solubles (r = -0.901), de la Proline (r = -0.952), et des protéines (r = -0.842) et positivement avec la chlorophylle totale (r = 0.742). La proline a une très forte corrélation positive avec les sucres solubles (r = 0.948) et les protéines (r = 0.659) et négative avec la chlorophylle totale (r = -0.804).

En effet, une corrélation positive de l'ordre de (r = 0.535) respectivement observée entre les teneurs en protéines d'une part et les teneurs en sucres soluble d'autre part. Les taux du rapport ch.a/ch.b sont positivement corrélées avec les teneurs en chlorophylle totale (r = 0.622) ; alors que ce dernier est négativement corrélée avec la teneur en sucres soluble (r = -0.950). Les quantités de malonediaaldéhyde sont positivement corrélées avec la

Chlorophylle a, b, et totale, et négativement corrélées avec les sucres solubles, la proline et les protéines.

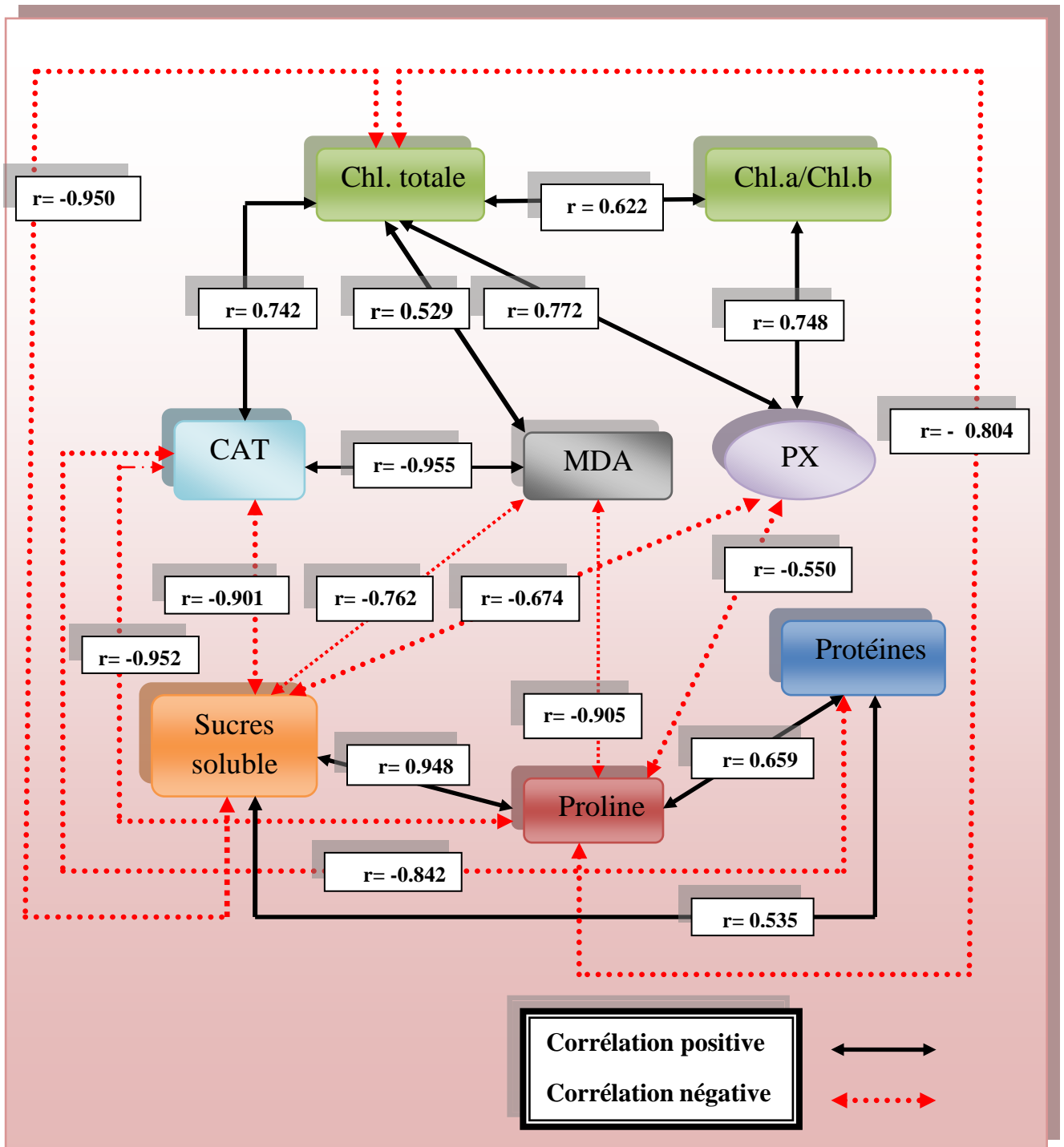


Figure 70. Corrélation entre les paramètres biochimiques de semis de pin pignon soumis aux hautes températures

4.1.2. Basses Températures

4.1.2.1. Teneurs en chlorophylle

➤ Chlorophylle (a) et (b)

La figure 71 montre les variations des teneurs en chlorophylle (a) et chlorophylle (b) au niveau des aiguilles des semis de pin pignon pour les différentes températures. L'analyse de la variance à un seul critère de classification montre des différences très hautement significatives en fonction des températures pour la Ch (a) et Ch (b) ($p < 0.0001$) (Annexe 7, Tableau 2).

Les teneurs en chlorophylle (a) sont toujours supérieures à la chlorophylle (b), les plus faibles sont enregistrées à la température -10°C pour la chlorophylle (a) et (b) avec une diminution de 62% pour la chlorophylle (a) et 48% pour la chlorophylle (b). Suite à la lecture des résultats, on remarque que la température 2°C présente des variations presque identiques au témoin pour la chlorophylle (a) et (b).

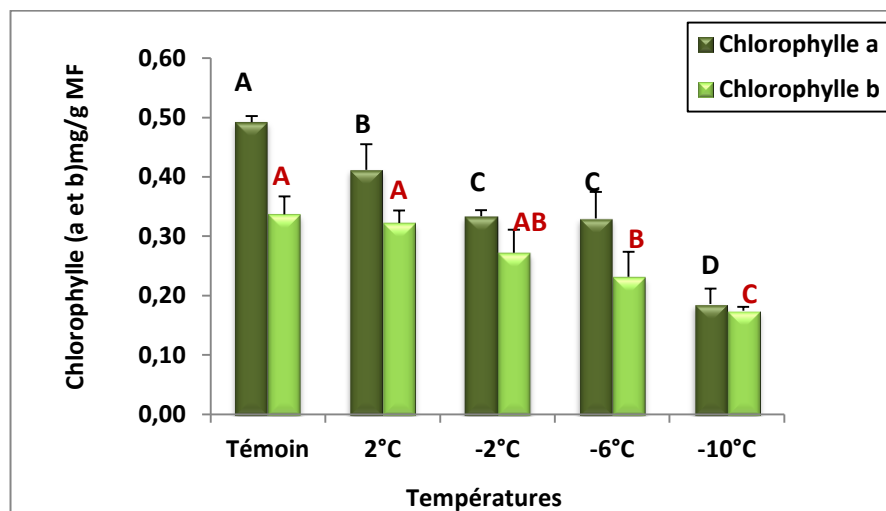


Figure 71. Teneurs en chlorophylle (a et b) des aiguilles de pin pignon

Le classement des traitements thermiques en fonction de la teneur en chlorophylle (a) et (b) suit la séquence suivante :

$$[\text{Témoin}] > [2^{\circ}\text{C}] > [-2^{\circ}\text{C}] > [-6^{\circ}\text{C}] > [-10^{\circ}\text{C}]$$

La comparaison des moyennes par le test de Newman et Keuls donne quatre groupes homogènes pour la chlorophylle (a) dont le témoin occupe le premier groupe, tandis que la température 2°C occupe la deuxième groupe, les températures -2°C et -6°C sont affectées

respectivement au troisième groupe, et la température -10°C occupe le dernier groupe avec la plus faible moyenne. Alors que pour la chlorophylle (b) le test de Newman et Keuls donne quatre groupes où le premier groupe (A) représente par le témoin et la température 2°C , le dernier groupe avec la température -10°C , tandis que les températures -2°C et -6°C sont affectées au groupe intermédiaires.

➤ **Rapport ch.a / ch.b**

Les résultats du rapport de chlorophylle (a/b) des aiguilles des semis de Pin pignon durant le stress aux hautes températures, illustrées par la figure 72, montrent des variations importantes.

Les teneurs les plus élevées sont signalées pour le témoin, alors que la température -10°C présente les teneurs des taux de diminution les plus fortes.

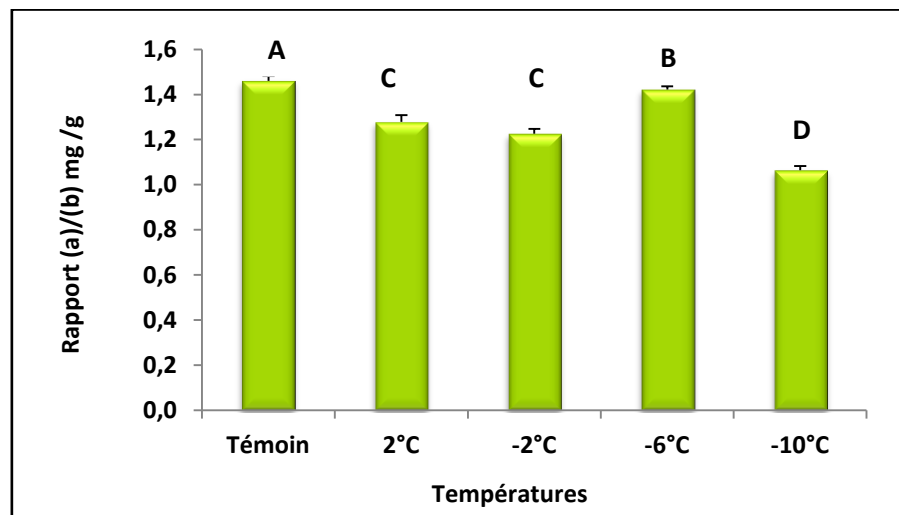


Figure 72. Variation du rapport (chl a/b) des aiguilles de pin pignon

Le classement des traitements thermiques en fonction de la teneur en chlorophylle (a/b) suit la séquence suivante :

$$[\text{Témoin}] > [-6^{\circ}\text{C}] > [2^{\circ}\text{C}] > [-2^{\circ}\text{C}] > [-10^{\circ}\text{C}]$$

L'analyse de la variance à un critère révèle des différences très significatives entre les différents niveaux de température (Annexe 7, Tableau 2). Le test de Newman et Keuls fait ressortir quatre groupes homogènes, le premier correspond au témoin avec la plus forte moyenne (1.460 mg/mol/mg MF) et le deuxième occupe par la température -6°C , la troisième

groupe regroupe les températures 2°C, -2°C dont les moyennes sont respectivement 1.249 et 1.226 ml mol /mg MF.

4.1.2.2. Teneurs en sucres solubles

Les teneurs en sucres solubles dans les différents organes des semis de pin pignon présentent des variations importantes entre les différentes températures. Elles tendent à augmenter avec la diminution de la température (Fig 73). Les teneurs les plus élevées sont signalées au niveau des tiges dont l'augmentation varie de 36.5% à 397.22% enregistrées respectivement aux températures -2°C et -10°C. Alors que les teneurs les plus faibles sont enregistrée au niveau des racines dont les concentrations selon l'ordre thermique suivant (2°C) < (-2°C) < (-6°C) < (-10°C).

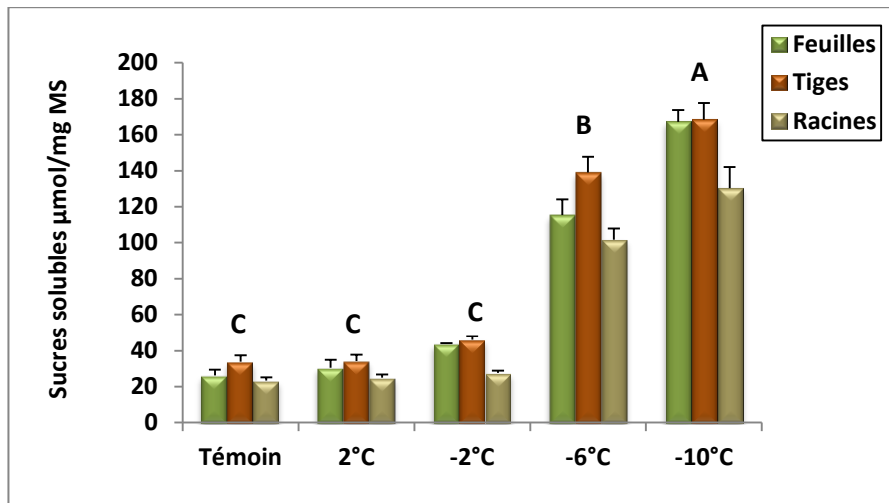


Figure 73. Teneurs en sucres solubles dans les différents organes des semis de pin pignon

Le classement des traitements thermiques en fonction de la teneur en sucres solubles suit la séquence suivante :

$$[-10^{\circ}\text{C}] > [-6^{\circ}\text{C}] > [-2^{\circ}\text{C}] > [2^{\circ}\text{C}] > [\text{Témoin}]$$

Tableau 49. Taux de variation des teneurs en sucres solubles pour les basses températures

	Témoin	2°C	-2°C	-6°C	-10°C
Aiguilles	26.260	30.576	43.833	115.419	167.205
Tiges	33.874	34.309	46.239	139.010	168.431
Racine	23.356	24.993	27.715	101.649	130.406

L'analyse de la variance montre une différence très hautement significative entre les températures ($p < 0.0001$) (Annexe 7, Tableau 2). Le test de Newman et Keuls fait ressortir trois groupes homogènes le premier correspond à la température -10°C avec la moyenne la plus forte ($155.347\mu\text{mol}/\text{mg MS}$), le deuxième est occupé par la température -6°C , et le dernier groupe par les températures -2°C , 2°C et le témoin avec la plus faible moyenne ($28.553\mu\text{mol}/\text{mg MS}$).

4.1.2.3. Teneurs en proline

Pour les basses températures, les taux d'accumulation de la proline par rapport au témoin sont illustrés dans le tableau 50. Les teneurs les plus élevées sont enregistrées de la température -10°C et les plus faibles pour 2°C . Au niveau des organes, les teneurs les plus élevés sont signalés au niveau des tiges avec une augmentation de 404% à la température -10°C . Alors que les teneurs les plus faibles sont signalées au niveau des racines à la température 2°C , -2°C et le témoin et aux niveaux des feuilles aux températures -6°C et -10°C (Fig 74).

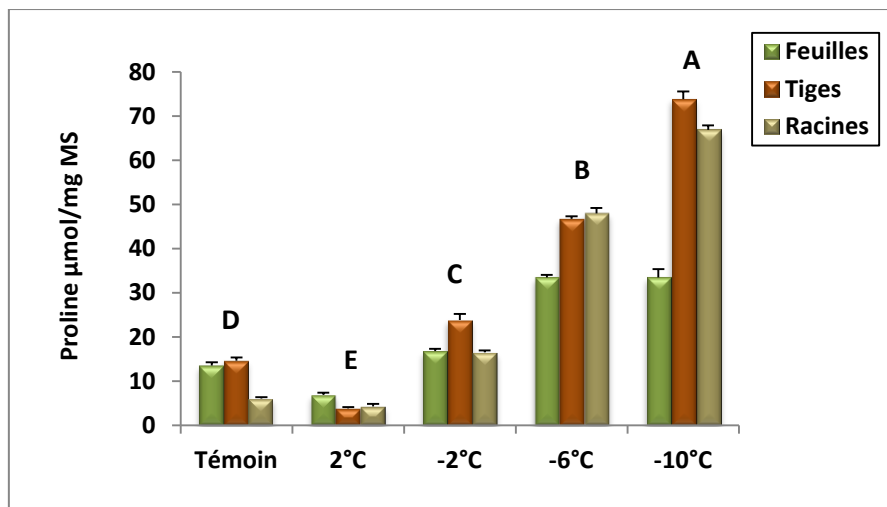


Figure 74. Teneurs en proline dans les différents organes des semis de pin pignon

Le classement des traitements thermiques en fonction de la teneur en proline s'établit selon la séquence suivante :

$$[-10^{\circ}\text{C}] > [-6^{\circ}\text{C}] > [-2^{\circ}\text{C}] > [\text{Témoin}] > [2^{\circ}\text{C}]$$

Tableau 50. Taux de variation des teneurs en proline pour les basses températures

	Témoin	2°C	-2°C	-6°C	-10°C
Aiguilles	13.52	6.839	16.828	33.459	33.459
Tiges	14.641	3.854	23.863	46.726	73.817
Racine	6.049	4.261	16.531	47.939	66.875

L'analyse de la variance à un critère de classification montre une différence très hautement significative entre les différentes températures ($p < 0.0001$) (Annexe 7, Tableau 2). La comparaison des moyennes avec le test de Newman et Keuls fait sortir cinq groupes homogènes, le premier correspond à la température -10°C avec une moyenne de $71.109 \mu\text{mol}/\text{mg MS}$, alors que le dernier groupe comprend la température 2°C ($5.347 \mu\text{mol}/\text{mg MS}$).

4.1.2.4. Teneurs en protéines

Les résultats obtenus montrent que la valeur maximale en protéine est enregistrée au niveau des aiguilles à la température -10°C ($1.322 \mu\text{mol}/\text{mg MS}$), tandis que la valeur minimale est observée au niveau des tiges au témoin ($0.471 \mu\text{mol}/\text{mg MS}$).

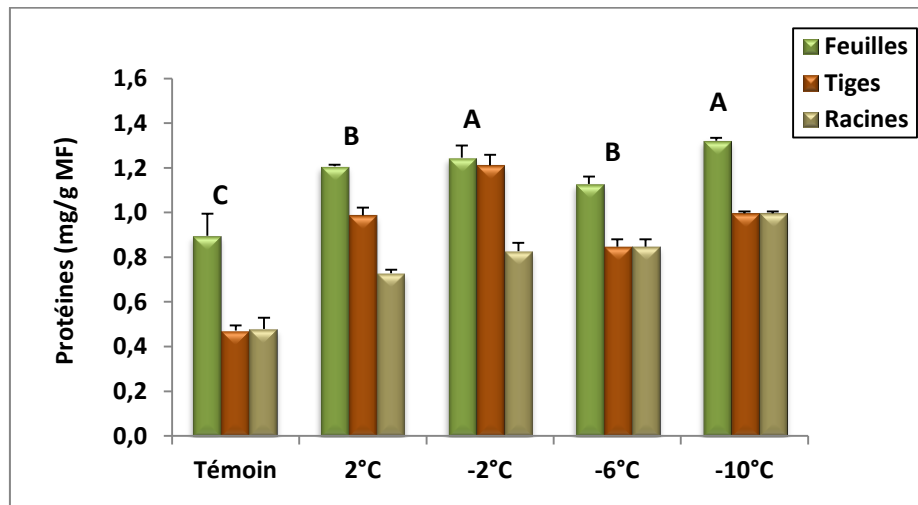


Figure 75. Teneurs en protéine dans les différents organes des semis de pin pignon

Le classement des traitements thermiques en fonction de la teneur en protéines s'établit selon la séquence suivante :

$$[-10^{\circ}\text{C}] > [-2^{\circ}\text{C}] > [2^{\circ}\text{C}] > [-6^{\circ}\text{C}] > [\text{Témoin}]$$

Tableau 51. Taux de variation des teneurs en protéines pour les basses températures

	Témoin	2°C	-2°C	-6°C	-10°C
Aiguilles	0.896	1.207	1.245	1.128	1.322
Tiges	0.471	0.988	1.211	0.847	0.996
Racine	0.478	0.728	0.827	0.847	0.996

L'analyse de la variance montre une différence très hautement significative entre les différentes températures ($p < 0.0001$) (Annexe 7, Tableau 2). L'analyse statistique révèle l'existence de trois groupes homogènes où le premier groupe (A) correspond aux températures -10°C et -2°C avec les plus fortes moyennes 1.105 µmol/mg MS, 1.098 µmol/mg MS, le second (B) correspond à la température 20°C et -6°C, ensuite le témoin est affecté au dernier groupe (C) avec la plus faible moyenne 0.621 µmol/mg MS.

4.1.2.5. Teneurs en catalase et activité spécifique de catalase

Les valeurs obtenues en catalase et de son activité spécifique montrent une augmentation importante par rapport au témoin durant la diminution de la température où les valeurs les plus élevées sont enregistrées à la température -10°C avec une augmentation de 172% pour la catalase, et les plus faibles moyennes à la température 2°C.

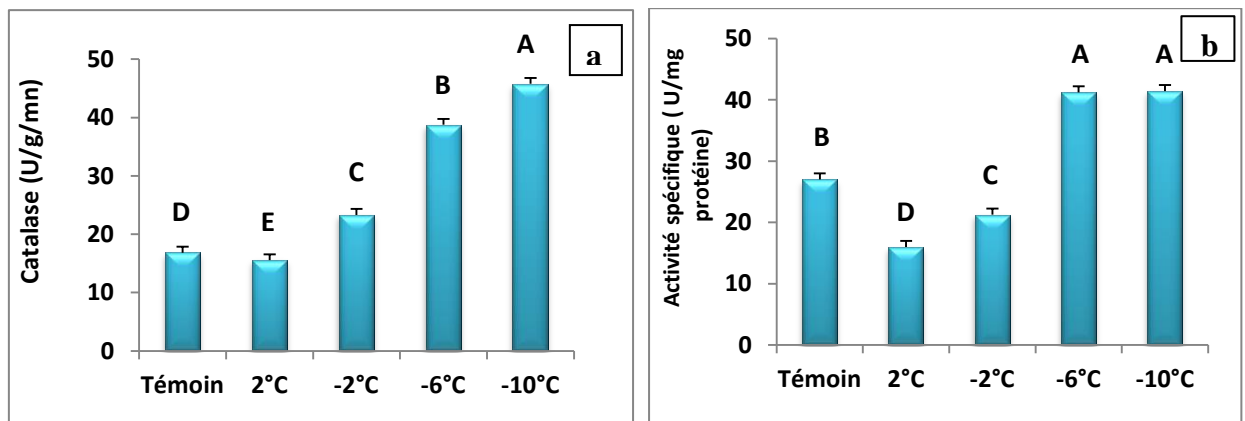


Figure 76. a: Teneurs en catalase, b: activité spécifique de la catalase au niveau des aiguilles du pin pignon

Le classement des traitements thermiques en fonction de la teneur en catalase et l'activité spécifique de catalase s'établit selon la séquence suivante :

$$[-10^{\circ}\text{C}] > [-6^{\circ}\text{C}] > [\text{Témoin}] > [-2^{\circ}\text{C}] > [2^{\circ}\text{C}]$$

L'analyse de la variance montre une différence très hautement significative entre les différentes températures ($p < 0.0001$) (Annexe 7, Tableau 2). La comparaison des moyennes fait sortir cinq groupes homogènes pour la catalase, le premier correspond au traitement -10°C avec la plus forte moyenne 45.792 U/g et le dernier groupe correspond à 2°C avec la plus faible moyenne 15.552 U/g . On note quatre groupes homogènes pour l'activité spécifique de catalase où les températures -10°C et -6°C occupent le premier groupe avec la moyenne la plus élevée 41.441 U/mg , et la température 2°C occupe le dernier groupe avec la plus petite moyenne 15.967 U/mg .

4.1.2.6. Teneurs en peroxydase et activité spécifique de peroxydase

Les valeurs obtenues en peroxydase montrent aussi une augmentation importante où la plus grande teneur est rencontrée à -10°C , par contre la plus faible teneur est enregistrée à la température 2°C . L'intensité de l'activité spécifique de la peroxydase par rapport au témoin est respectivement comprise entre 18.847 U/g à la température -6°C et 19.620 U/g à la température -10°C .

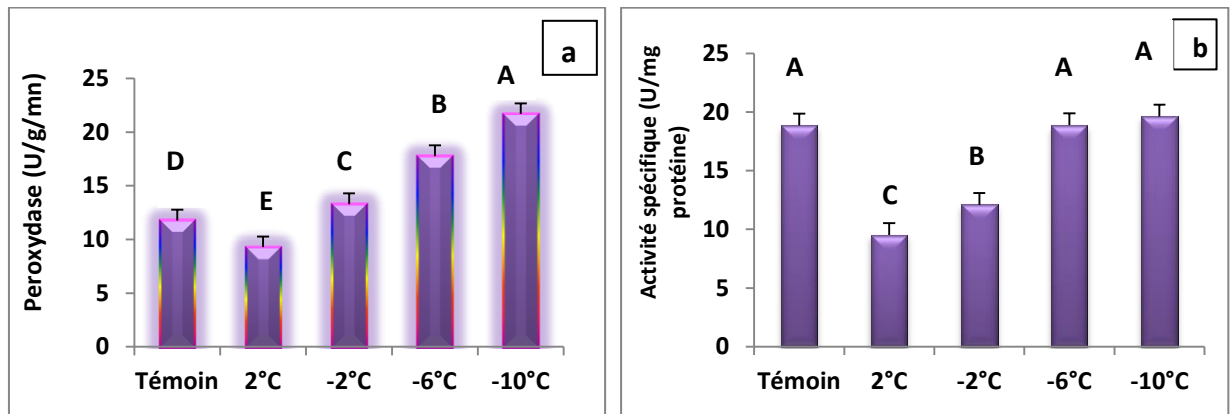


Figure 77. a: Teneurs en peroxydase, b: activité spécifique de la peroxydase au niveau des aiguilles du pin pignon

Le classement des traitements thermiques en fonction de la teneur en peroxydase suit la séquence suivante :

$$[-10^{\circ}\text{C}] > [-6^{\circ}\text{C}] > [-2^{\circ}\text{C}] > [\text{Témoin}] > [2^{\circ}\text{C}]$$

Le classement des traitements thermiques en fonction de la teneur en activité de peroxydase suit la séquence suivante :

$$[-10^{\circ}\text{C}] > [-6^{\circ}\text{C}] > [\text{Témoin}] > [-2^{\circ}\text{C}] > [2^{\circ}\text{C}]$$

L'analyse de la variance est très hautement significative entre les différentes températures (Annexe 7, Tableau 2). D'après le test de Newman et Keuls à 5%, on a cinq groupes homogènes pour la peroxydase dont la température -10°C constitue le premier groupe (A) avec une moyenne de 21.680 U/g et la température 2°C occupe le dernier groupe (E) avec la plus faible moyenne 9.280 U/g.

Trois groupements homogènes (A), (B) et (C) pour l'activité spécifique de peroxydase, le groupe (A) est représenté par les traitements -10°C, -6°C et le témoin, qui reflètent les moyennes les plus fortes. Le groupe (C) est représenté par la température 2°C avec la plus petite moyenne.

4.1.2.7. Corrélation entre les variables étudiées

Tableau 52. Matrice de corrélation des principaux paramètres biochimiques mesurés dans les semis de Pin pignon après l'application des traitements thermiques pour les basses températures

variable	Chl.a	Chl.b	Chl.t	Ch.a/b	Sucres	Proline	Protéine	CAT	PX
Chl.a	1	0.963	0.995	0.814	-0.855	-0.889	-0.816	-0.880	-0.860
Chl.b		1	0.985	0.640	-0.950	-0.957	-0.668	-0.974	-0.958
Chl.t			1	0.756	-0.898	-0.922	-0.769	-0.923	-0.904
ch.a/b				1	-0.466	-0.585	-0.813	-0.470	-0.481
Sucres					1	0.964	0.453	0.987	0.967
Proline						1	0.463	0.965	0.986
Protéine							1	0.502	0.431
CAT								1	0.984
PX									1

Ch.a: Chlorophylle a ; *Ch.b*: Chlorophylle b ; *Ch.t*: Chlorophylle totale ; *Ch.a/b*: Rapport ch.a/ch.b ; *CAT* : Catalases ; *PX* : Peroxydases.

D'après les résultats et au seuil de 5%, les teneurs en catalase aux basses températures sont négativement corrélées en chlorophylle totale ($r = -0.923$), et positivement avec la Proline ($r = 0.965$), les sucres solubles ($r = 0.987$), les Protéines ($r = 0.502$), et la peroxydase ($r = 0.984$).

Ainsi, les quantités de la peroxydase sont positivement corrélées avec les celles des sucres solubles ($r = 0.967$), de la Proline ($r = 0.986$), et négativement avec la chlorophylle totale ($r = -0.904$). La proline a une très forte corrélation positive avec les sucres soluble ($r = 0.964$) et négative avec la chlorophylle totale ($r = -0.585$).

En effet, une corrélation positive de l'ordre de ($r = 0.756$) et respectivement observée entre les teneurs en chlorophylle totale d'une part et les teneurs en rapport chl.a/chl.b d'autre part.

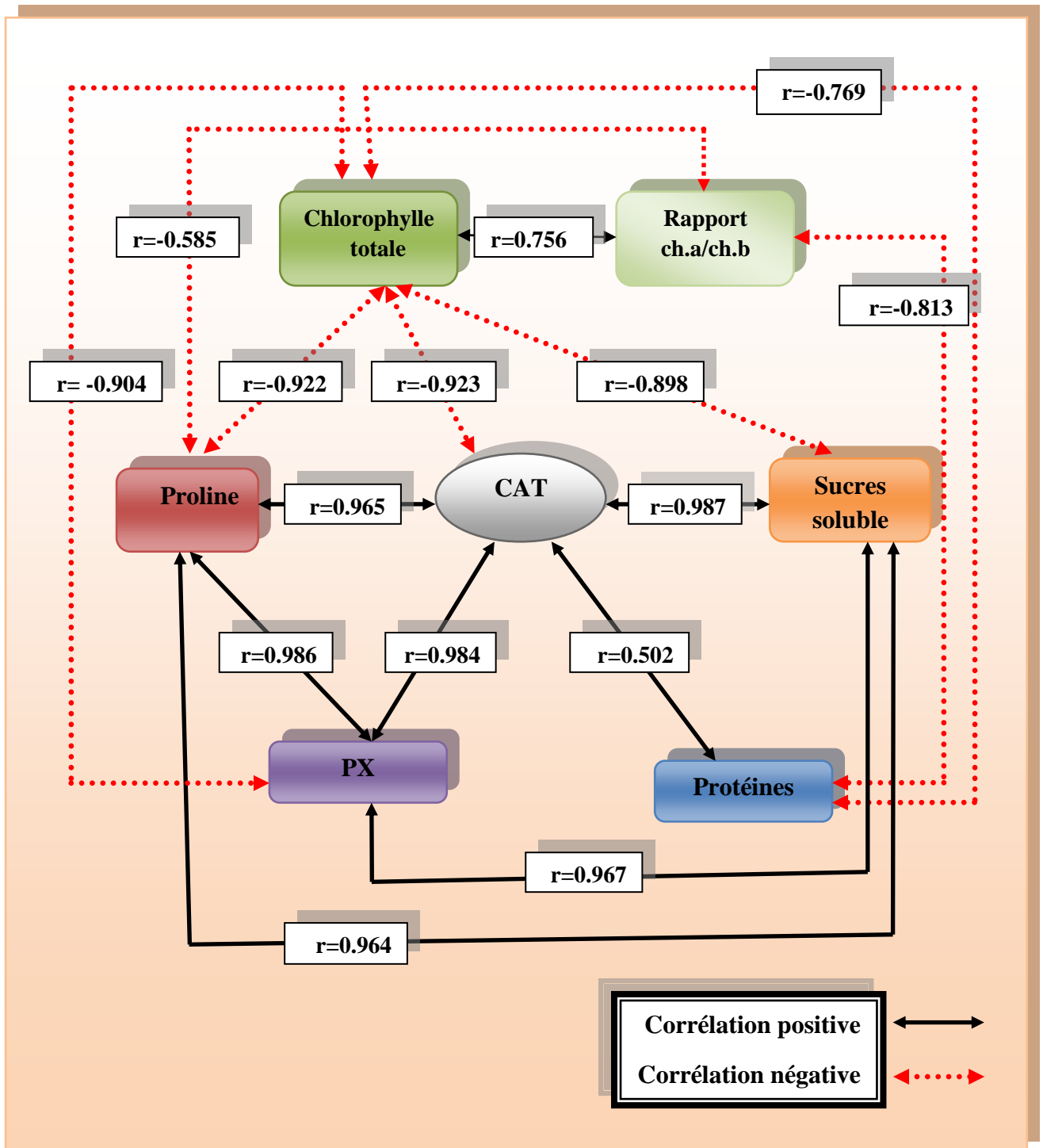


Figure 78. Corrélation entre les paramètres biochimiques de semis de pin pignon soumis aux basses températures

4.1.3. Discussion

Les résultats obtenus, à partir de l'étude des marqueurs biochimiques de résistance chez les jeunes plants de pin pignon soumis aux conditions naturelles et à des conditions de stress thermique à une gamme de hautes températures comprises entre 38°C et 50°C, ont montré que la réponse de cette espèce dépend de deux facteurs : organe et intensité du stress (degrés de température).

Les chlorophylles (a) et (b) présentent une fluctuation entre les différents traitements thermiques. Une augmentation importante de teneur est enregistrée à la température 38°C, tout en restant inférieures à celles enregistrées chez le témoin pour les températures 44°C et 50°C. Le dosage de la teneur en chlorophylle (a) et (b), la déduction de rapport chl a / chl b, établies chez les aiguilles des jeunes plants de pin pignon sous différents régimes thermiques, révèlent que les plantes stressées réagissent par une augmentation de leur teneur en chlorophylle totale et de rapport chl a / chl b.

La comparaison de l'effet de différents niveaux de température sur la teneur en chlorophylle totale au niveau des aiguilles des semis de Pin pignon indique que la teneur est plus élevée par rapport au témoin, alors que une diminution des teneurs en chlorophylle totale au niveau des aiguilles des semis de pin d'Alep est obtenue à 44°C (Laala, 2009).

Les résultats obtenus montre que l'accumulation de la proline et des sucres solubles au niveau des différents organes des semis de Pin pignon ; elle suggère une forte accumulation des sucres solubles et même de la proline chez les semis qui ont subi un traitement thermique à 50°C. Pour ce traitement thermique, on a signalé une augmentation de l'ordre de 273% au niveau des aiguilles, et de 285.67% à 306% au niveau des tiges alors que les racines ont gagné plus de 451% par rapport au témoin.

Ces résultats suggèrent une corrélation importante entre le métabolisme azoté et Carboné. En effet, pour les traitements à haute température, l'accumulation de la proline est accompagnée d'une importante concentration des sucres solubles. Ces résultats confirment ceux de Laouar (1977) qui a montré qu'au niveau de la feuille, l'accumulation de la proline semble être reliée au facteur lumière et à un niveau important de glucides.

Les sucres et l'amidon stockés dans les organes pérennes peuvent servir de réserves tampons, lesquelles sont mobilisées lorsque le carbone fixé par la photosynthèse devient insuffisant aux besoins instantanés de la plante. La répartition du carbone nouvellement fixé et du carbone des réserves est déterminée par la force de puits relative des divers organes (Keller et al. 1995 in Castelan-Estrada, 2001).

En effet l'accumulation des sucres solubles dans les conditions climatiques chaudes a été signalée par plusieurs auteurs. Elle est considérée comme un facteur déterminant du niveau de tolérance chez les végétaux. Barlow et al. (1976) montrent que la présence des sucres solubles en période de chaleur et de sécheresse protégerait les thylakoïdes de l'altération irréversible des membranes et exercerait une action favorable sur la résistance protoplasmique à la sécheresse.

Pour notre étude, la concentration des sucres solubles est plus importante au niveau des tiges par rapport à la partie racinaire. Ce ci est en désaccord avec les résultats obtenus par Williams, (1996) et Zapata, (1998) qui montrent que l'amidon et les sucres solubles sont plus abondants dans les racines que dans le tronc de la vigne, et confirment le rôle prépondérant des racines comme organe de stockage des glucides.

Hare et al. (1998) suggèrent que sous stress thermique la proline est transférée à partir des cellules sources, qui possèdent la capacité de synthétiser la proline, vers des cellules cibles qui ont une forte demande en énergie. Ober et Sharp, (1994) mentionnent que l'ABA est nécessaire pour l'accumulation de la proline sous faible potentiel. L'ABA joue probablement un rôle de régulateur dans le transport de la proline inter-sites, source et utilisateur (Ober et Sharp, 1994).

Les protéines ont aussi connu une variation de leur concentration après le stress thermique (hautes températures). On a enregistré une forte accumulation à 38°C, 44°C et 50°C pour une période de 3h au niveau des aiguilles. Elles s'accumulent suite à un stress à la chaleur. Cette augmentation est due à une activation d'un ensemble de gènes permettant la synthèse des protéines spécifiques associées aux stress tels que les protéines "LEA" qui assurent une protection de l'ensemble vitale des protéines cellulaires (David et Grongnet, 2001) et les protéines de choc thermique qui permettent un maintien des structures protéiques et membranaires de la cellule végétale (Baker et al.1988).

L'implication des HSP dans le phénomène nommé «thermotolérance» a été démontrée. Les HSP ainsi synthétisées permettent la «renaturation» des protéines et la récupération de l'activité enzymatique (Souren et al. 1999). La durée de stress thermique affecte négativement la teneur en protéines. Les cellules, qui ont été soumises à un pré-choc thermique avant d'être soumises à un autre stress, présentent une résistance accrue lors du deuxième stress. En fonction des organes, l'accumulation des protéines est plus importante au niveau des aiguilles par rapport aux tiges et racines.

En conditions optimales, les ROS sont produites d'une façon contrôlée et elles ont des fonctions importantes telles que la biosynthèse des parois cellulaires et la signalisation de Redox (Foyer et Noctor, 2003). Cependant, les conditions contraignantes mènent à une surproduction des ROS. Et pour contrecarrer leur toxicité, les cellules sont bien équipées par un système antioxydatif fortement efficace, qui renferme les enzymes du cycle ascorbateglutathion, la superoxyde dismutase (SOD), les peroxydases (PX) et la catalase (CAT) et des molécules comprenant l'acide ascorbique, le glutathion et les composés phénoliques (Foyer et Noctor, 2003).

Les mesures obtenues pour les teneurs en activité de catalase au niveau des aiguilles de Pin pignon indiquent une diminution par rapport au témoin, où la plus petite valeur est observée à 50°C, alors que l'analyse en cinétique des effets de différentes doses de Cd sur le niveau d'activité de cette enzyme chez la fève montre le maintien d'une activité équivalente à celle de témoin dans la partie aérienne de la plante (Souguir, 2009).

Les teneurs en activité de peroxydase sont également importantes au niveau des aiguilles des semis de Pin pignon par rapport au témoin où la plus grande moyenne est enregistrée au niveau d'une température 38°C, par contre, cette enzyme montre un niveau d'activité inchangé par rapport au témoin au niveau du système foliaire (Souguir, 2009).

Il est connu que les peroxydases interviennent dans de nombreuses fonctions physiologiques. Sur un premier plan, les peroxydases interviennent dans le catabolisme de l'auxine et dans le contrôle de la croissance cellulaire (Wahid et al. 2007).

D'autre part, il a été démontré que les peroxydases ioniques à localisation pariétale sont impliquées dans les processus de lignification et de régidification des parois cellulaires (Sato et al. 1995 in Majourhat et Baaziz, 2004). Indépendamment de leur rôle, les peroxydases assurent, communément la réduction du peroxyde d'hydrogène en eau au dépend d'autres molécules à haut pouvoir réducteur.

Ainsi l'augmentation de l'activité des peroxydases pourrait être considérée comme une réponse générale à toute une variété de stress. Cette réponse est très souvent associée au rôle des peroxydases dans la lignification des parois qui aboutit à la diminution de leur plasticité et la limitation de l'élongation cellulaire (Ijaz et al. 2012).

Le rôle des peroxydases dans la défense antioxydative a été évoqué par Athar et al. (2008), il démontre que l'activité peroxydasique testée par le guaïacol est stimulée par le cadmium au niveau de tous les organes de tournesol et seulement au niveau de la partie aérienne dans le cas du maïs. Au niveau de la partie aérienne du maïs, ce sont les peroxydases

qui semblent jouer un rôle capital dans l'élimination du peroxyde d'hydrogène causé par le stress cadmié. Toutefois, au niveau des racines c'est la catalase qui assure ce rôle.

Le malonedialdéhyde (MDA) est présent naturellement dans les tissus, où il est une manifestation du stress oxydant. Il est issu notamment de l'action des dérivés réactifs de l'oxygène sur les acides gras polyinsaturés (William et al. 1975). Les taux élevés de MDA signent donc un stress oxydatif, portant notamment sur l'oxydation des lipides.

Une diminution importante de la teneur en MDA des aiguilles des semis de pin pignon durant le stress à la température chaude, et atteint un maximum à la température 50°C.

La comparaison de l'effet thermique sur la teneur en malonedialdéhyde au niveau des aiguilles des semis de Pin pignon indique que la teneur est faible par rapport au témoin. Mahi et al. (2015), montrent aussi une diminution en teneur de MDA au niveau des feuilles des deux espèces *Atriplex halimus* L. et *Atriplex canescens*.

L'induction du MDA observée chez la moule méditerranéenne *M. galloprovincialis* après 24h témoigne d'un stress au niveau cellulaire, La diminution de ce bio-marqueur enregistrée par la suite (après 72 h) peut être un signe de dommage plus important dans les conditions pro-oxydantes (Bendjoudi et al. 2013)

Comme Le MDA semble être dépassé, la défense antioxydante du mollusque est probablement assurée par d'autres enzymes telles que la glutathion Stransférase (Belabed et Soltani, 2013)

Selon Hernández et al. (2000), une variabilité d'accumulations de MDA, produit final de la peroxydation lipidique, considéré comme indicateur de stress oxydatifs résultant de plusieurs stress abiotiques.

Concernant ces résultats, les traitements thermiques à basse température ont un effet significatif sur les paramètres biochimiques mesurés. Pour les teneurs en chlorophylles après l'application de ces traitements thermiques, on note une baisse de la chlorophylle totale par rapport au témoin. Cette diminution s'accroît au fur et à mesure que la température appliquée diminue à -10°C soit une réduction de 56.5%.

Parallèlement à l'augmentation de la teneur en proline sous l'effet du stress, une baisse dans les teneurs en pigments chlorophylliens totaux (Chlorophylles a et b) a été, en revanche, enregistrée. Cette diminution est plus marquée chez les pousses adultes que chez les jeunes pousses.

Ces résultats suggèrent l'existence d'une connexion vraisemblable entre les voies de biosynthèse des pigments chlorophylliens et de la proline. Une compétition entre ces

deux composés sur leur précurseur commun, le glutamate, peut être à l'origine de cette évolution (Bengston et al. 1978 in Tahri et al. 1998).

Ainsi, Tahri et al. (1998) ont confirmé que la baisse de l'activité de l'enzyme Glutamine synthétase (GS) semble être relativement proportionnelle à la baisse des teneurs en pigments chlorophylliens et inversement proportionnelle aux teneurs de proline accumulée et que la biosynthèse des pigments chlorophylliens serait, en toute vraisemblance, liée à l'activité GS. Ces pigments utiliseraient le glutamate produit notamment par cette enzyme.

L'accumulation des solutés (proline et sucres solubles) dépend étroitement du traitement thermique appliqué et de la nature de l'organe. Les résultats montrent que les traitements thermiques à -6°C et -10°C ont induit une accumulation remarquable des sucres solubles et même de la proline dans les organes des semis de pin pignon. Cette accumulation est plus importante au niveau des tiges. Par contre la température 2°C provoque des taux d'accumulations faibles par rapport aux autres traitements thermiques. Ces résultats montrent l'existence d'une liaison positive entre la teneur en proline et la teneur en sucres solubles ($r= 0.964$).

En outre, nous remarquons que les plantes stressées ont réagi aussi par l'accumulation des protéines au niveau des différents organes. La teneur la plus élevée est observée chez les semis traitées à -10°C pour les aiguilles.

Un grand nombre de protéines induites par les stress environnementaux ont la caractéristique d'être thermostables et plusieurs d'entre elles ont été identifiées chez les graminées à la suite de l'exposition à des températures froides (Lin et Thomashow, 1992). Le rôle cryoprotecteur de ces protéines proviendrait de la protection contre la déshydratation cellulaire, du maintien du transport des métabolites cellulaires et de la protection de l'intégrité de certaines protéines (Houde et al. 1995).

Toutefois, une augmentation de la concentration des protéines totales durant l'endurcissement au froid a été documentée chez plusieurs plantes (Davis et Gilbert, 1970 ; Mckenzie et al.1988).

Ainsi, l'augmentation de l'activité des peroxydases pourrait être considérée comme une réponse générale à toute une variété de stress. Cette réponse est souvent associée au rôle des peroxydases dans la lignification des parois qui aboutit à la diminution de leur plasticité et la limitation de l'élongation cellulaire (Sanchez et al. 1995 in Baccouch, 2001).

L'activité de la peroxydase est élevée pour les semis traités par rapport au non traités (témoin), et atteint un maximum de 84% à la température -10°C .

Une augmentation importante de l'activité de catalase est observée durant le stress thermique des basses températures ; les valeurs les plus importants sont enregistrées à -10°C avec le taux maximum d'augmentation par rapport au témoin.

La matrice des corrélations réalisée pour les paramètres biochimiques , montre des corrélations négatives, hautement significatives entre la teneur en proline et la teneur en chlorophylle totale ($r = -0.585$), et même entre la teneur en sucres solubles et la teneur en chlorophylle totale ($r = -0.898$). On note aussi que les teneurs en protéines sont négativement corrélées aux teneur en chlorophylle totale ($r = -0.769$). C'est-à-dire plus les teneurs en proline, en sucres solubles et en protéines s'accumulent dans les organes, plus les teneurs en chlorophylle totale s'abaissent et vis vers ça.

Les pins sont des espèces polycycliques qui présentent donc deux pousses annuelles. La croissance dépendant de processus biologiques complexes comme la photosynthèse, la migration des sucres, les mouvements de l'eau dans le tronc (Poupon, 1970).

4.2. Stress hydrique

Les paramètres biochimiques : teneurs en proline, sucres solubles et chlorophylle sont mesurés dans les différents organes des semis de pin pignon (*Pinus pinea*) soumis aux stress hydrique. Les variations observées sur ces paramètres sont illustrées dans les figures ci-dessous.

4.2.1. Teneurs en chlorophylles

➤ Chlorophylles (a et b)

Les résultats obtenus de chlorophylles (a) et (b) dans les aiguilles du pin pignon soumis aux stress hydrique sont illustrées dans la figure 79. Ces résultats montrent que la chlorophylle (a) présente des valeurs plus élevées par rapport à celles de la chlorophylle (b). Le témoin correspond à une valeur très forte à partir de 1.014mg/g MF pour la chlorophylle (a) et 0,707mg/g MF pour la chlorophylle (b) suivit par une diminution de -43.88% au dernier niveau atteint 0,569mg/g MF pour la chlorophylle (a). Concernant la chlorophylle (b), une légère augmentation au niveau (1), suivit par une diminution remarquable au niveau (2) atteint 0.297mg/g MF suite à une légère augmentation de 16.57% au niveau (3) soit 0.356mg/g MF. L'analyse de la variance à un seul critère de classification montre une différence très hautement significative ($p < 0,0001$) (Annexe 7, Tableau 3).

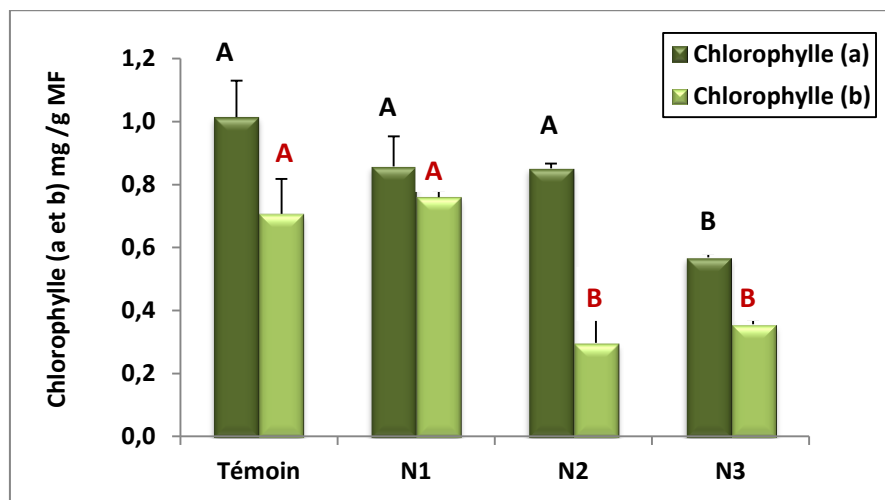


Figure 79. Teneurs en chlorophylle (a et b) des aiguilles de pin pignon pour les différents niveaux de stress hydrique

Le test de Newman et Keuls au seuil de 5%, révèle l'existence de deux groupes homogènes où le témoin, niveau (1) et le niveau (2) occupent le premier groupe (A), le second groupe réunit le niveau (3) pour la chlorophylle (a), alors que, pour la chlorophylle (b),

le premier groupe englobe le Témoin et le niveau (1) avec les moyennes élevés, le seconde groupe correspond aux niveau (2) et (3).

➤ **Rapport ch.a / ch.b**

Les résultats présentés sur la figure 80 montrent les variations du rapport chlorophylle a/b en fonction des niveaux de stress hydrique. Ce rapport est compris entre 1.472 pour le témoin et 1,601 pour le dernier niveau 3 avec une forte augmentation au niveau 2 de 51.24% soit : 3.019 mg/g MF.

L'analyse de la variance révèle qu'il existe des différences significatives entre les différents niveaux de stress ($P < 0.0029$) (Annexe 7, Tableau 3).

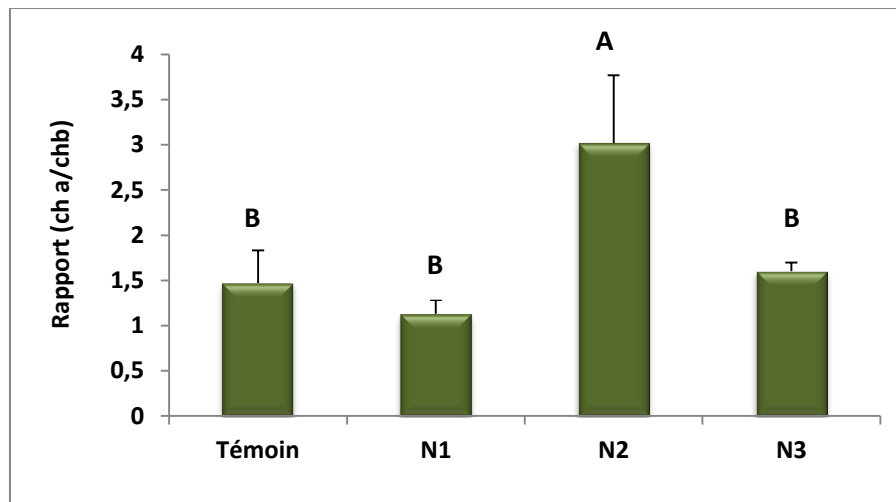


Figure 80. Variation du rapport ch.a /ch.b des aiguilles de pin pignon pour les différents niveaux de stress hydrique

Les résultats de l'analyse statistique révèlent l'existence de deux groupes où le premier groupe A correspond au niveau 2 avec la plus forte moyenne, ensuite le témoin et les niveaux 1 et 3 qui comprennent le groupe B.

4.2.2. Teneurs en proline

Les valeurs obtenues sont converties en taux de proline par le biais d'une « courbe étalon » (Fig 81), préalablement établie à partir d'une série de solution de concentration en proline connue. Cette courbe est utilisée pour déterminer les teneurs en proline dans les différents organes de plante.

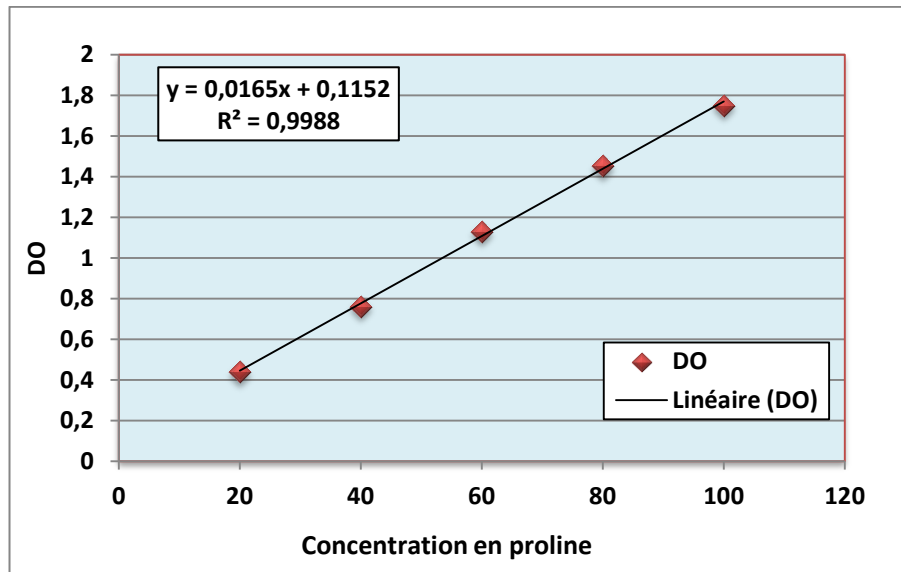


Figure 81. Courbe étalon de la proline

Les résultats de la figure 82 montrent que les teneurs les plus importantes en proline sont retrouvées dans les aiguilles, comparativement aux racines et aux tiges. Les augmentations de la proline dans les aiguilles et les tiges des semis de pin pignon caractérisent le niveau 1 et 2. Au niveau des racines l'accumulation de la proline est observée au niveau 1 et 3. L'analyse de la variance à deux critères de classification montre qu'il existe des différences significatives ($p < 0.0024$) entre les organes et les niveaux de stress hydrique appliqués (Annexe 7; Tableau 3).

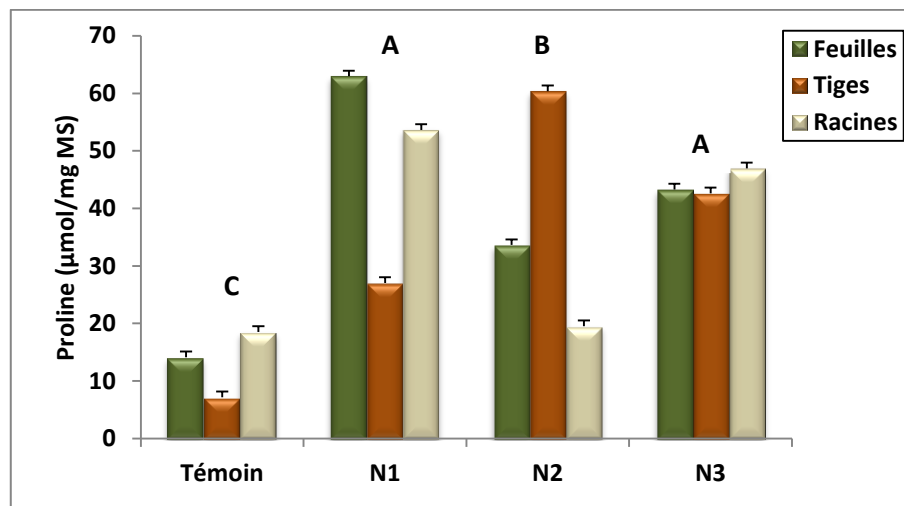


Figure 82. Teneurs en proline des semis de pin pignon pour les différents niveaux de stress hydrique

L'analyse statistique des résultats obtenus maitre l'existence de trois groupes, le niveau N1 et N3 représente le groupe (A) avec les moyennes les plus élevées, le témoin forment le groupe (C) avec une faible moyenne (13.27).

4.2.3. Teneurs en sucres solubles

Les résultats des densités optiques sont rapportés sur un courbe étalon (Fig 83) des sucres solubles (exprimés en glucose).

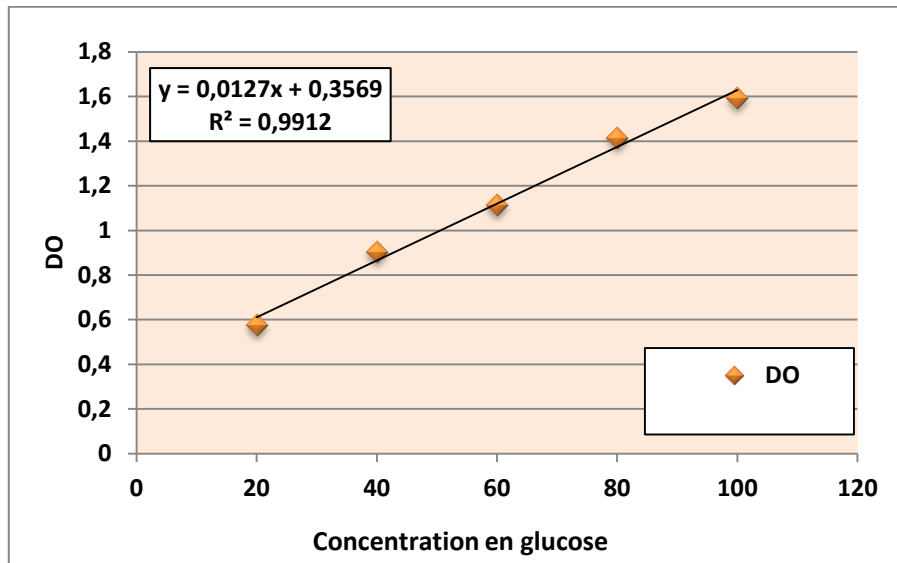


Figure 83. Courbe étalon des sucres solubles

Les résultats de la figure 84, montrent que les teneurs en sucres sont observées beaucoup plus dans les aiguilles et les tiges au cours du stress hydrique.

L'analyse de la variance à deux critères de classification montre qu'il existe des différences très significatives entre les organes et entre les différents niveaux de stress (Annexe 7; Tableau 3).

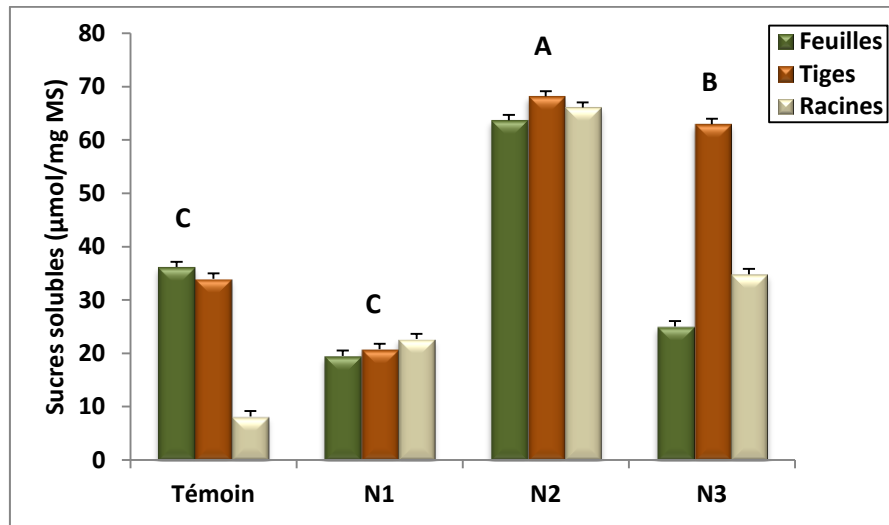


Figure 84. Teneurs en sucres solubles des semis de pin pignon pour les différents niveaux de stress hydrique

L'analyse statistique des résultats obtenus montre l'existence de trois groupes homogènes. Le niveau 2 occupe le groupe (A) avec la moyenne la plus élevée et le niveau 1 et le témoin occupent le groupe (C) avec les moyennes les plus faibles.

4.2.4. Corrélation entre les variables étudiés

L'étude des différentes corrélations a pour objet de déterminer d'éventuelles relations entre les différents paramètres physiologiques (Fig 85, Tab 53).

Tableau 53. Matrice de corrélation des principaux paramètres biochimiques mesurés dans les semis de *Pinus pinea* après l'application des différents niveaux de stress hydrique

Variables	Chl.a	Chl.b	Chl(a+b)	Chl.a/b	Proline	Sucres
Chl.a	1	0.601	0.866	0.000	-0.689	-0.250
Chl.b		1	0.920	-0.778	-0.286	-0.909
Chl(a+b)			1	-0.488	-0.516	-0.691
Chl.a/b				1	0.003	0.968
Proline					1	0.153
Sucres						1

Chl .a: Chlorophylle a ; *Chl .b:* Chlorophylle b ; *Chl (a+b):* Chlorophylle totale ; *Ch.a/b :* rapport

Au seuil de 5%, les teneurs en proline sont négativement corrélées avec celles de la chlorophylle (a) ($r = -0.689$) et la chlorophylle totale ($r = -0.516$). A l'exception de la proline (pas de corrélation avec les sucres solubles).

Les taux de chlorophylle totale sont négativement corrélés avec les teneurs en sucres solubles ($r = -0.691$), tandis que ce dernier est négativement corrélé avec la quantité en chlorophylle (b) ($r = -0.909$).

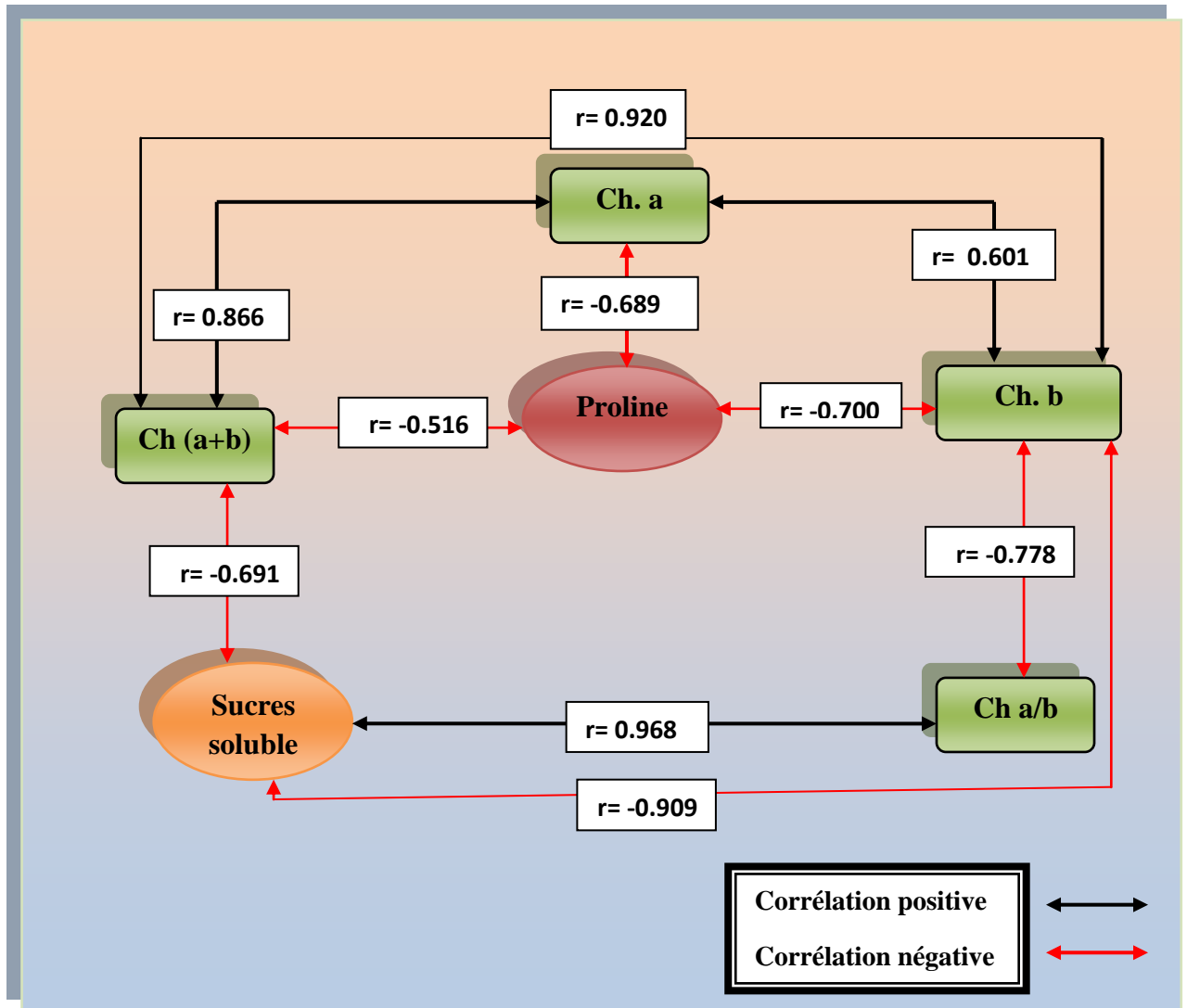


Figure 85. Corrélations entre les paramètres biochimiques des semis de pin pignon soumis au stress hydrique

4.3. Stress combiné (hydrique et thermique)

4.3.1. Teneur en chlorophylle

Concernant la chlorophylle (b), les résultats varient de la même tendance que ceux de la chlorophylle (a). Pour le stress combiné (hydrique et thermique), la diminution des chlorophylles est plus sévère pour toutes les températures à tous les niveaux. La réduction est de -90% pour la chlorophylle (a), et de -87% pour la chlorophylle (b) pour le niveau N3.

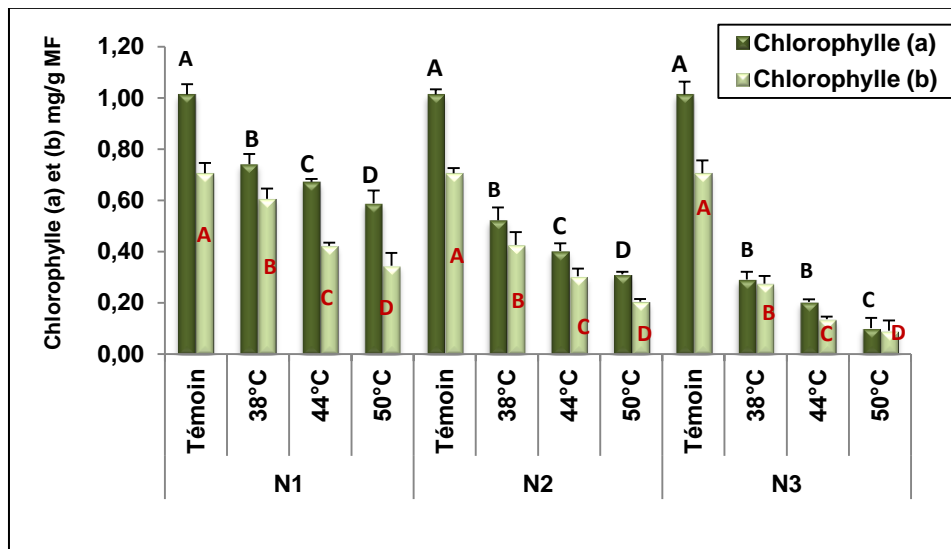


Figure 86. Teneurs en chlorophylle (a et b) des aiguilles de pin pignon

Le test de Newman et Keuls à 5% montre que la chlorophylle a et b varient dans le même sens à savoir l'obtention de groupe homogène pour les différentes températures et niveaux. Pour le niveau 3, la chlorophylle a présente trois groupes homogènes dont le B renferme les températures 38°C et 44°C. Pour la chlorophylle b, on retrouve les quatre groupes avec les plus faibles moyennes à la température 50°C.

L'analyse de la variance ($p < 0.0001$) montre une différence très significative entre les différents traitements thermiques (Annexe 7, Tableau 4)

4.3.2. Teneurs en proline

Les résultats de la figure 87 montrent que les teneurs les plus importantes en proline sont retrouvées dans les aiguilles, comparativement aux racines et aux tiges. Au cours du

stress combiné, les teneurs en proline obtenues, sont supérieures à celles du témoin jusqu'au dernier niveau N3 pour les différents températures.

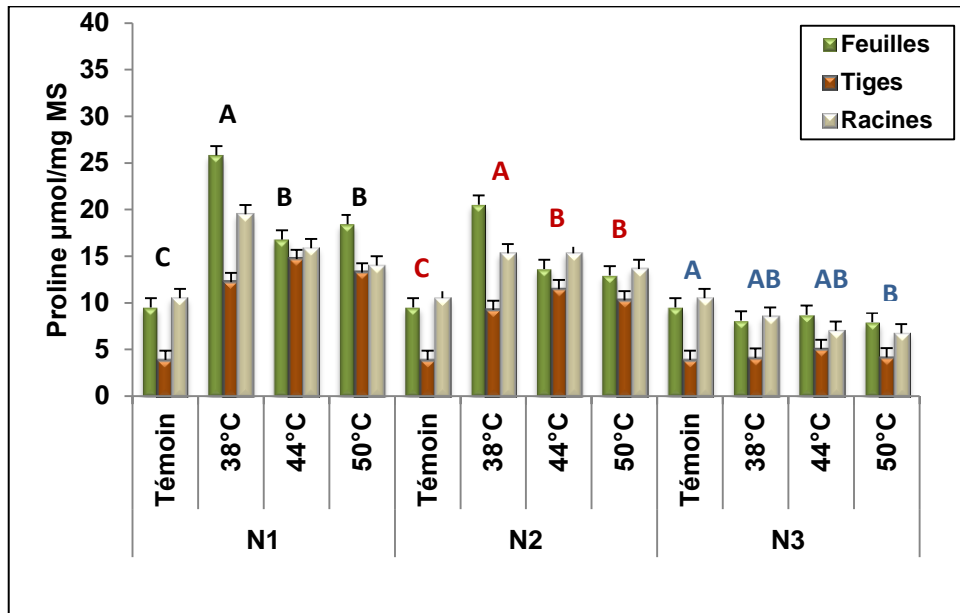


Figure 87. Teneur en proline au niveau de différents organes des semis de pin pignon

A partir du test Newman et Keuls, La comparaison des moyennes fait sortir trois groupes homogènes pour les différents niveaux de stress combiné, le premier groupe est représenté par les moyennes les plus fortes ; alors que le dernier groupe est observé chez le témoin pour le niveau N1 et N2, et la température 50°C pour le niveau N3, qui caractérise la moyenne la plus faible. L'analyse de la variance signale des différences très significatives entre les températures ($p < 0.0001$) (Annexe 7, Tableau 4).

Pour les organes, l'analyse statistique révèle l'existence de trois groupes homogènes pour le niveau N1 et deux groupes pour le niveau N2 et N3 (Tab 54). La teneur en proline est plus élevée au niveau des aiguilles comparativement avec les racines et les tiges.

Tableau 54. Test de Newman et Keuls à 5%

Organes	Niveau (N1)		Niveau (N2)		Niveau (N3)	
	Moy	Groupes	Moy	Groupes	Moy	Groupes
Aiguilles	17.837	A	14.234	A	8.453	A
Racines	14.968	B	13.682		8.189	
Tiges	11.008	C	8.709	B	4.298	B

4.3.3. Teneurs en sucres solubles

La forte teneur en sucres solubles est enregistrée au niveau des aiguilles, alors que la plus faible est observée au niveau des racines à différents traitements hydriques et thermiques (Fig 88).

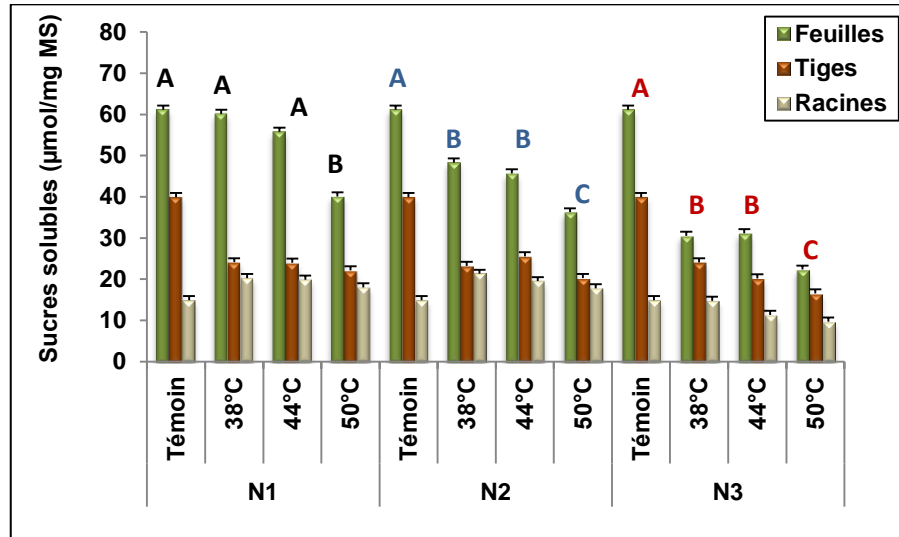


Figure 88. Teneur en sucres solubles au niveau de différents organes des semis de pin pignon

A partir du test Newman et Keuls, La comparaison des moyennes fait sortir trois groupes homogènes au cours du stress combiné pour les niveaux N2 et N3, le premier présente les moyennes les plus fortes ; alors que le dernier groupe reflète les moyennes les plus faibles.

Pour le niveau N1, le test fait sortir deux groupes, le premier englobe le témoin N1 et N2, et le second correspond à la température de 50°C. L'analyse de la variance à un critère de classification signale des différences très hautement significatives entre les températures ($p < 0.0001$) (Annexe 7, Tableau 4).

Les résultats illustrés dans le tableau 55 montrent des variations importantes dans l'accumulation des sucres solubles au niveau des différents organes en fonction des stress hydriques et thermiques. Les aiguilles sont des organes de stockage, elles se comportent en puits avec des teneurs élevées en sucre solubles ; comparativement aux tiges et racines.

Tableau 55. Test de Newman et Keuls à 5%

Organes	Niveau (N1)	Niveau (N2)	Niveau (N3)	Groupes
Aiguilles	55.122	48.257	36.183	A
Tiges	27.521	27.143	25.161	B
Racines	18.259	18.369	12.661	C

4.3.4. Corrélation entre les variables étudiées

L'étude des différentes corrélations a pour objet de déterminer d'éventuelles relations entre les différents paramètres physiologiques.

Tableau 56. Matrice de corrélation des principaux paramètres biochimiques mesurés après l'application de stress combiné (niveau 1)

Variabes	Chl (a)	Chl (b)	Proline	Sucres solubles
Chl (a)	1	0.922	-0.761	0.898
Chl (b)		1	-0.458	0.927
Proline			1	-0.467
Sucres solubles				1

Chl (a): Chlorophylle a ; Chl (b): Chlorophylle b

Une corrélation positive entre la chlorophylle (a) et (b) et les sucres solubles, alors que, la chlorophylle (a) est négativement corrélée avec la proline.

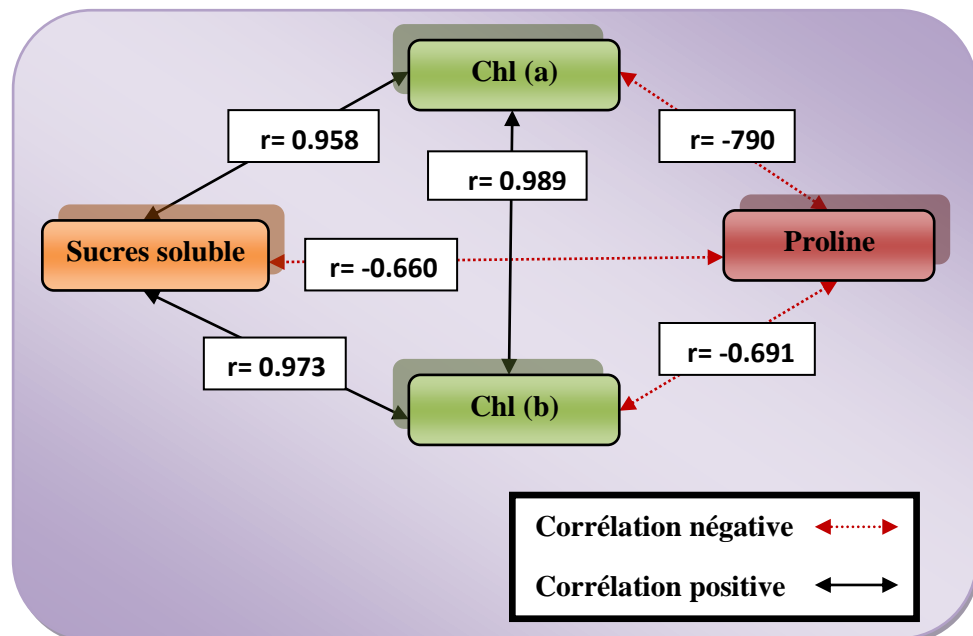


Figure 89. Corrélations entre les paramètres biochimiques des semis de pin pignon (N2) soumis au stress hydrique

Au seuil de 5%, les teneurs en sucres solubles sont positivement corrélées avec celles de la chlorophylle (a) et (b) et négativement corrélées avec la proline ($r = -0.660$), alors que ce dernier et négativement corrélées avec la chlorophylle (a) et la chlorophylle (b).

Tableau 57. Matrice de corrélation des principaux paramètres biochimiques mesurés après l'application de stress combiné (niveau 3)

Variables	Chl (a)	Chl (b)	Proline	Sucres solubles
Chl (a)	1	0.993	0.978	0.993
Chl (b)		1	0.979	0.990
Proline			1	0.996
Sucres solubles				1

Chl (a): Chlorophylle a ; Chl (b): Chlorophylle b

Au seuil de 5%, une corrélation positive entre tous les paramètres étudiés.

4.3.5. Discussion

Plusieurs études ont montré que, lors d'une contrainte thermique, les plantes adoptent des stratégies d'adaptation qui diffèrent d'une espèce à une autre, qui font intervenir une large combinaison de facteurs morphologiques, physiologiques et biochimiques (Monneveux et Belhassen, 1997). De ce fait, ces changements imposent la réflexion sur les stratégies à entreprendre pour comprendre les mécanismes mis en jeu par les plantes afin de s'adapter aux nouvelles conditions de l'environnement et de maintenir leur croissance et leur productivité (Belkhodja et Bidai, 2004), (Trinchant et al. 2004).

Une diminution importante de la chlorophylle (a) et (b) est observée durant l'application du stress hydrique et thermique. Des résultats similaires ont été rapportés chez une clémentine (*Citrus reticulata*) par Beniken, (2013), la teneur en chlorophylle diminue avec l'intensité du stress hydrique imposé. Laala et al. (2013) ont aussi signalé une baisse importante des teneurs en pigments photosynthétiques a été enregistrée durant les hautes températures (saison estivale). Parmi les causes possibles expliquant cette réduction, la destruction des membranes thylakoïdiennes cellulaires : une perte de la compartimentation cellulaire peut en effet inhiber le déroulement des grandes fonctions métaboliques (Cornic et Ghashghaie, 1991). Ainsi, Miller, (1993) a démontré que les températures élevées peuvent provoquer la dénaturation de protéines, l'inactivation des enzymes et la réduction de l'activité photosynthétique du chloroplaste.

Les semis soumis au stress hydrique manifestent des variations de proline selon le l'intensité de celui-ci. En effet, elles sont faibles dans les conditions normales, mais elles

augmentent avec le manque d'eau. Ces résultats sont en accord avec ceux de Monneveux et Nemmar, (1986) qui montrent que cette accumulation est très étroitement liée au manque d'eau et aux hautes températures. L'accumulation de la proline se comporte différemment dans les feuilles et les racines (Côme, 1992). Selon Kanouni (2013), L'exposition des semis de chêne liège aux hautes températures comprises entre 38°C et 44°C (S3) a induit en général une augmentation importante de la teneur en proline dans les différents organes.

Nos résultats montrent que la concentration en proline est plus marquée chez les aiguilles ; Ces résultats concordent avec ceux de Chaib et al. (2015) qui ont confirmé que La teneur en proline augmente proportionnellement dans les feuilles de blé dur avec la diminution du contenu hydrique dans le sol.

Les sucres solubles des semis de pin pignon sont généralement plus concentrés dans les aiguilles ; Les racines ne sont pas des tissus importants de stockage. Nos résultats concordent avec ceux de (Mefti et al. 2000) qui ont confirmé que le déficit hydrique a causé une accumulation importante des sucres solubles au niveau des feuilles. Les niveaux bas de l'amidon et du saccharose peuvent indiquer que les racines sont des organes de stockage permanents avec des besoins constants durant la période de croissance des parties aériennes (Alaoui-Sossé, 1994); ce qui montre la faible teneur en sucres solubles au niveau des racines stressées.

Depuis longtemps, il est connu que le taux de sucres augmente considérablement chez des plantes soumises aux différents types de stress ; cela a été observé par Chunyang (2013) chez des arbres d'*Eucalyptus microtheca* sous différents stress hydriques. Les principaux sucres solubles accumulés sous stress sont : le glucose, fructose et le saccharose (Hare et al.1998) et ces derniers semblent jouer un rôle très important dans le maintien d'une pression de turgescence qui est à la base des différents processus contrôlant la vie d'une plante.

L'augmentation de la teneur en sucres solubles serait liée à une amélioration du taux de la photosynthèse induit par le stress (Ben Khaled et al. 2003). Par ailleurs, il a été observé que sous stress hydrique, les réserves amylicées sont progressivement utilisées suite à leur conversion rapide en saccharose, qui pourra être associé à une inhibition de la synthèse de l'amidon (Bensari et al. 1990).

L'augmentation en sucres solubles pourrait avoir un rôle de protection des membranes. La présence de ces sucres solubles en période de chaleur et de sécheresse protégerait les thylakoides de l'altération irréversible des membranes et exercerait une action favorable sur la résistance protoplasmique à la sécheresse.

Marguery (1992), affirme que la température associée à l’insolation, pourrait être un facteur déterminant pour l’accumulation des sucres.

5. Architecture et adaptation phénologique du pin pignon au changement climatique

5.1. Observations sur la croissance

Si les conditions de croissance ne sont pas favorables (été, hiver ou sécheresse et gel), le stade phénologique peut se stabiliser durant plusieurs mois à la mauvaise année.

Les mensurations effectuées sur les arbres échantillons (Fig 90) ont permis de constater qu’il y a une décroissance remarquable de toutes les variables au cours des années 2001/2008 (les années de gel et de sécheresse). A partir de 2009 une croissance faible (l’impact des mauvaises années). La longueur de pousses (LP) et le nombre des futures branches (NB) varient de la même tendance durant les différentes années où les valeurs les plus élevées sont enregistrées en 1997/1998 et les plus faibles en 2015/2016. Tandis que, les cônes se développent inférieurement par rapport à la croissance des pousses et des branches au cours des années.

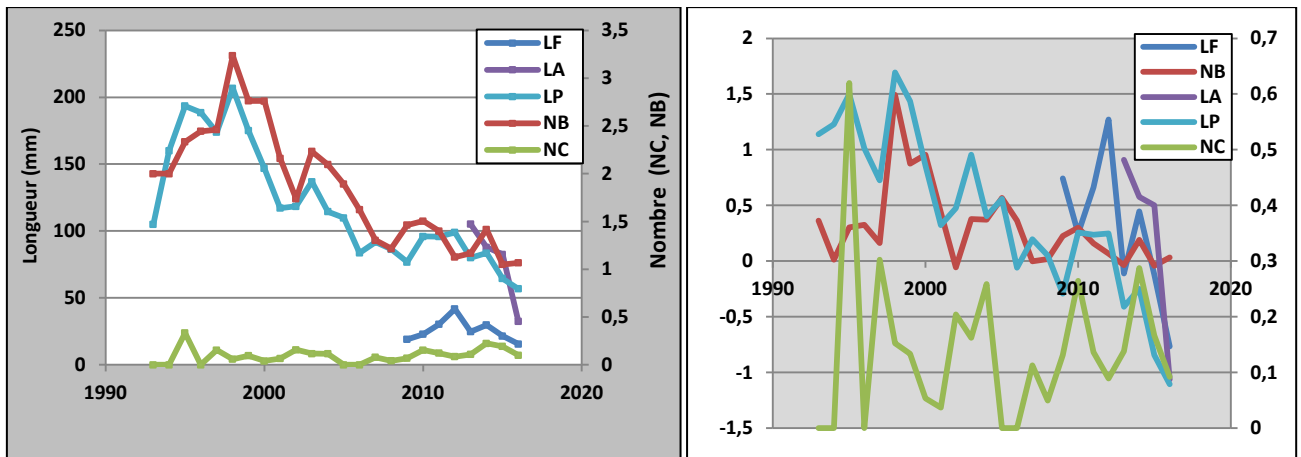


Figure 90. Relation entre les variables de croissance des arbres-échantillons de pin pignon en France au cours de la période (1993 – 2016)

L’Algérie est sous l’influence d’un climat méditerranéen ; Les étés sont chauds et secs, les hivers doux et humides. Les températures moyennes varient en fonction de l’altitude. Comme l’ensemble de l’aire méditerranéen, la région de Djebel Ouahch à Constantine est caractérisée par des précipitations irrégulières et soumises à l’alternance bien marquée d’une saison sèche et d’une saison de pluies.

Les mesures effectuées sur les arbres échantillons dans la station de Kef lekhel ont permis de constater qu'il y a une croissance remarquable de nombre des futures branches (NB) au cours des années. Le nombre important est observé au 2016 comparativement avec la longueur des pousses. Alors que, les cônes (NC) se développent inférieurement par rapport à la croissance des pousses (Fig 91).

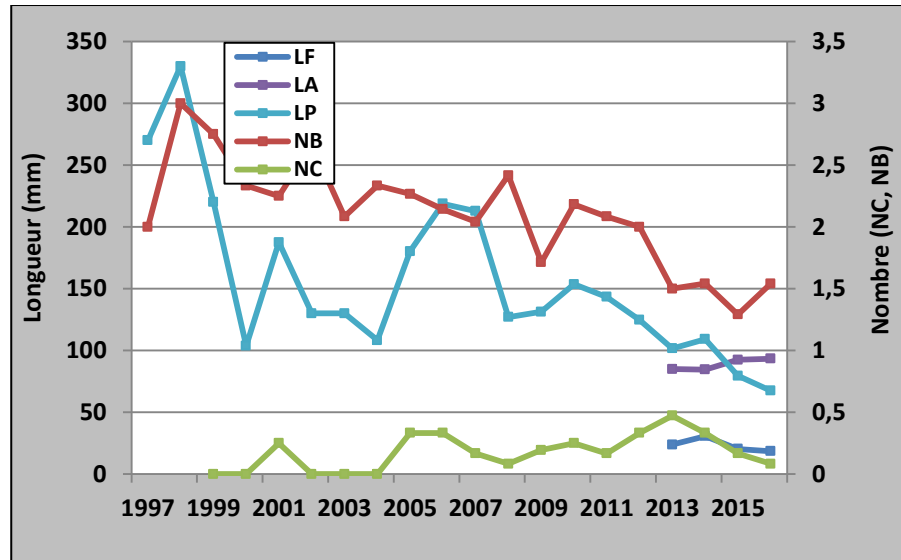


Figure 91. Relation entre les variables de croissance des arbres-échantillons de Pin pignon dans la région de Djebel Ouahch au cours de la période (1997-2016)

La figure 92 montre la relation entre les différentes variables de croissance pour les bas et les hauts rameaux de pin pignon. A partir de l'année 2000, on a observé une forte décroissance pour la longueur de pousses et le nombre des futures branches, ces dernières varient de la même tendance au cours des années, où les années 95/98 présentent les valeurs les plus élevées, par contre les années 2001/ 2007 sont les mauvaises années.

Suite à la lecture des résultats on remarque que, la production des cônes est mieux développée pour les hautes branches par rapport aux basses branches. Une bonne croissance des aiguilles (LA) en 2013 et de fleurs males (LF) en 2012, par contre, une mauvaise croissance en 2015/2016 (les années les plus secs).

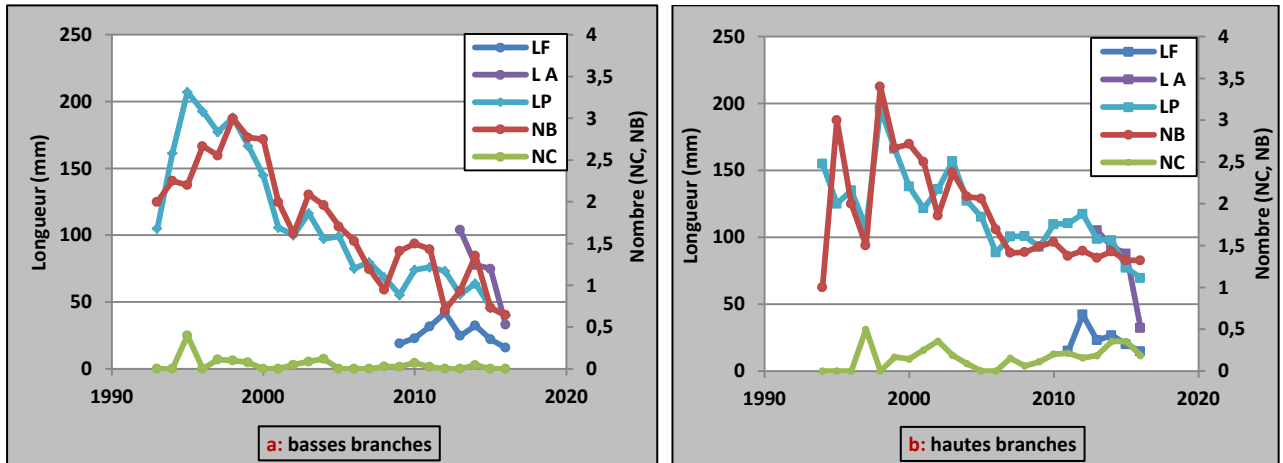


Figure 92. Relation entre les variables de croissance des arbres-échantillons de pin pignon en France au cours de la période (1993 – 2016), a: les basses branches ; b: les hautes branches

Dans la région de Djebel Ouahch, la longueur des pousses et le nombre des futures branches sont développées contrairement au cours des années pour les rameaux hauts et bas. La production des cônes est mieux développée pour les hautes branches par rapport aux basses branches durant les années 1999/2009. Une bonne croissance des aiguilles en 2015/2016 et de fleurs mâles en 2014.

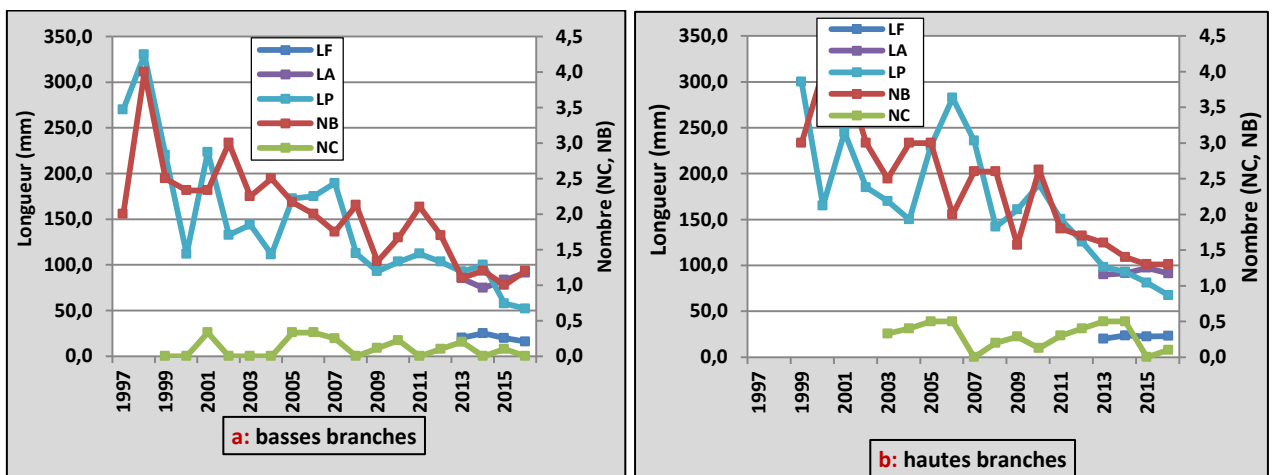


Figure 93. Relation entre les variables de croissance des arbres-échantillons de pin pignon dans la région de Djebel Ouahch au cours des années, a: les basses branches ; b: les hautes branches

Comme le montre la figure 94, la production de cônes est augmenté dans les branches principales par rapport à les deux paires rameaux secondaires (fortes et faibles branches) ; Elles sont augmentées durant les années 2010/2014 (années de pluvieumétrie).

L'année 1998 présente le nombre des futures branches et la longueur de pousses le plus élevée, par contre l'année 2009 présente la croissance faible.

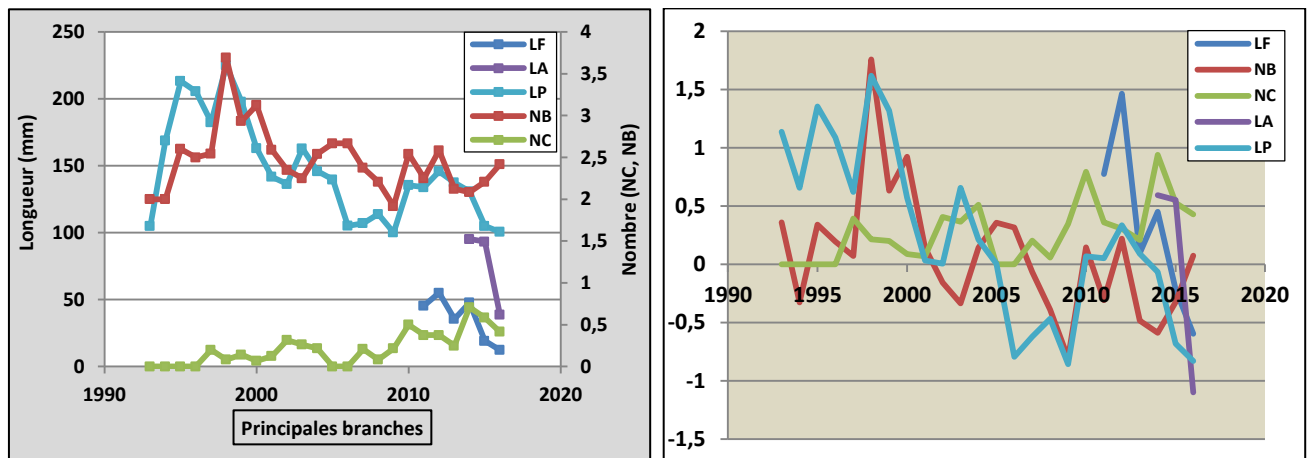


Figure 94. Relation entre les variables de croissance pour les principales branches des arbres-échantillons de pin pignon en France au cours de la période (1993 – 2016)

A la station de Kef lekhel, les axes principales présentent une production de cônes élevée par rapport à les deux paires axes secondaires (fortes et faibles branches) et par rapport à la station de Provence-Alpes-Côte d'Azur (Fig 95).

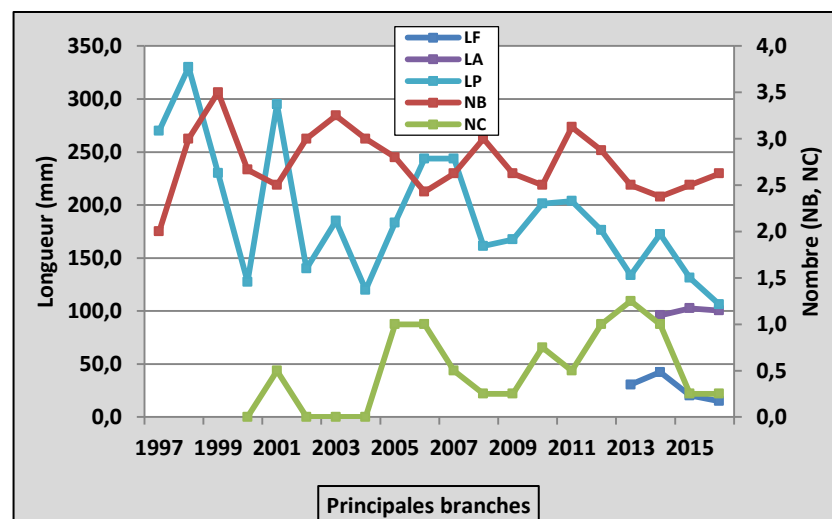


Figure 95. Relation entre les variables de croissance pour les principales branches des arbres-échantillons de pin pignon dans la région de Djebel Ouahch au cours des années

Les résultats présentés sur la figure 96, montrent une forte décroissance au cours des années pour la longueur de pousses et le nombre des futures branches pour les rameaux faibles par rapport aux rameaux forts.

Une bonne croissance de fleurs mâles en 2011, et des aiguilles en 2013, par contre la production de cônes reste très faible pendant les années 1994/2012 et la productivité important est enregistré en 2012/2014.

L'évolution des variables de croissance sont plus développées aux rameaux forts comparativement à des rameaux faibles.

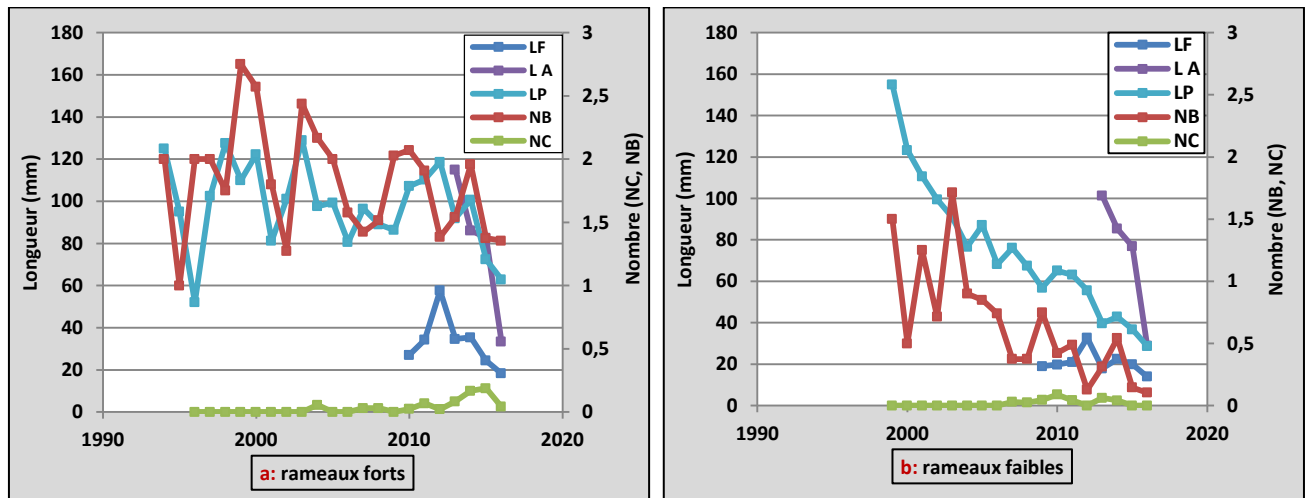


Figure 96. Relation entre les variables de croissance des arbres-échantillons de pin pignon en France au cours de la période (1993 – 2016), **a**: les rameaux forts; **b**: les rameaux faibles

Les résultats de la figure 97, montrent la relation entre les variables de croissance pour les forts et faibles rameaux des arbres-échantillons de pin pignon dans la région de Djebel Ouahch. L'évolution des variables de croissance sont plus développées aux rameaux forts comparativement à des rameaux faibles.

Une bonne croissance des aiguilles en 2016, par contre la production de cônes reste très faible au cours des années.

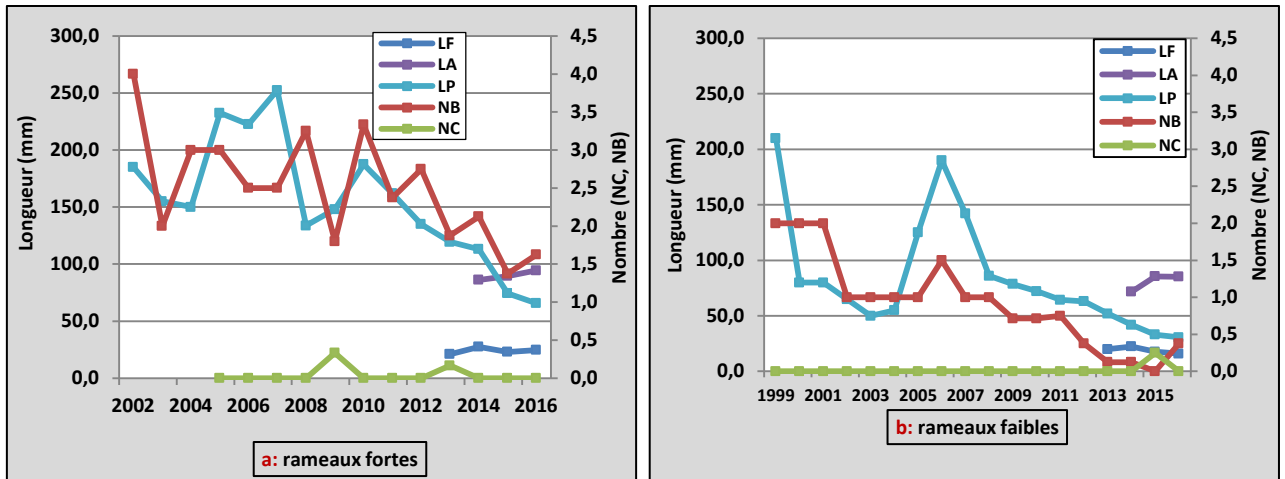


Figure 97. Relation entre les variables de croissance des arbres-échantillons de pin pignon dans la région de Djebel Ouahch au cours des années, a: les rameaux forts; b: les rameaux faibles

5.1.1. Longueur de pousses

Au cours des dernières années, les pousses commencent ses décroissances, de ce fait, les plus importantes longueurs de pousses sont retrouvées durant l'année 1994/1995.

A l'axe principal, la croissance de pousses est d'autant plus forte comparativement à les deux paire rameux (fort et faible, haut et bas).

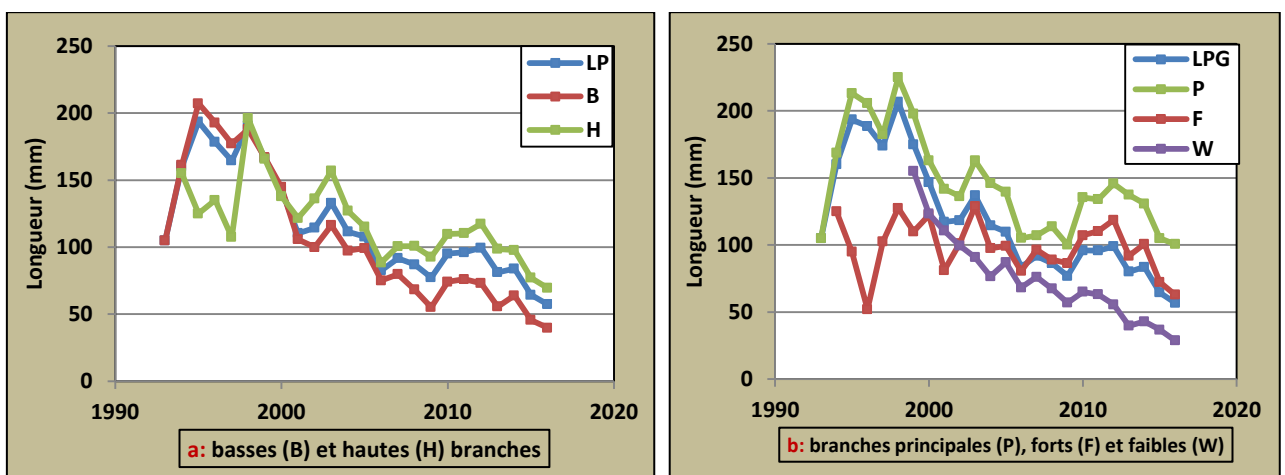


Figure 98. Evolution de la longueur des pousses des arbres-échantillons de pin pignon en France au cours de la période (1993 – 2016), a: basses (B) et hautes (H) branches; b: branches principales, forts et faibles

Dans la région de Djebel Ouahch, la longueur de pousses sont plus importantes pour les axes principaux par rapport aux axes faibles et forts, et plus croissante aux hautes branches comparativement avec les basses branches.

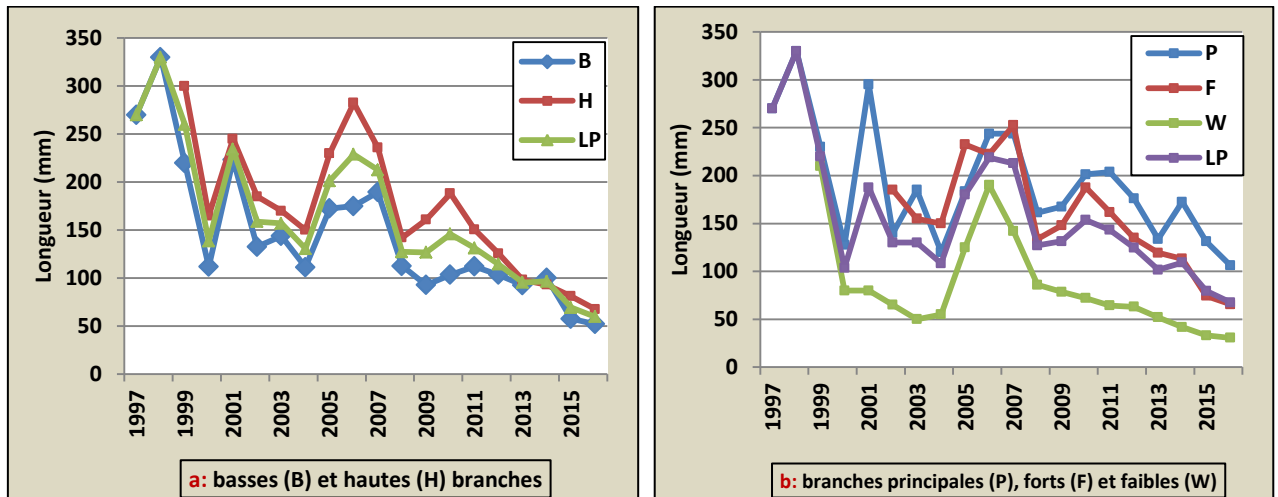


Figure 99. Evolution de la longueur des pousses des arbres-échantillons de pin pignon dans la région de Djebel Ouahch au cours des années, a: basses (B) et hautes (H) branches; b: branches principales, fortes et faibles

5.1.2. Longueur de fleurs mâles

Le climat particulièrement chaud des dernières années (2015-2016) a provoqué l'apparition et le développement de fleurs mâles de pin pignon.

Les fleurs étaient pleinement développées au cours de l'année 2011 – 2012 pour les basses et les hautes branches (rameaux) avec une croissance avancée de pousses.

Le gain en pourcentage s'est fait à la fois en multipliant les rameaux fleuris sur chaque branche du milieu et du bas du houppier, et en remontant de plus en plus haut dans le houppier.

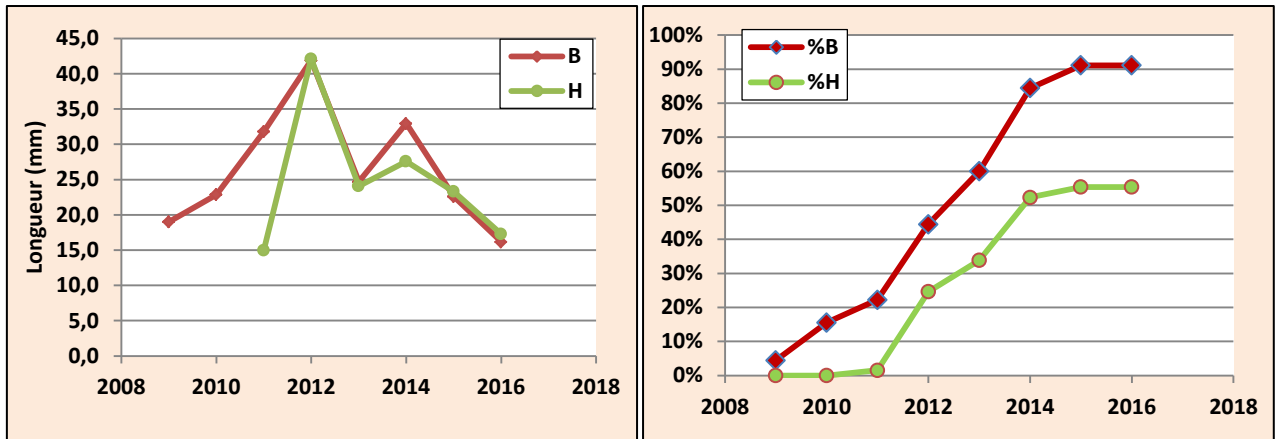


Figure 100. Evolution de la longueur des fleurs mâles des arbres-échantillons de pin pignon en France au cours de la période (2009 – 2016) pour les branches basses et hautes

La floraison mâle a été de plus en plus abondante au rameau principal entre 2013 et 2014. Elle est passée de 50 mm de longueur à plus de 80%. L'exclusion a fortement réduit ce taux de fleurs qui a atteint 0 -10% en 2009 – 2011.

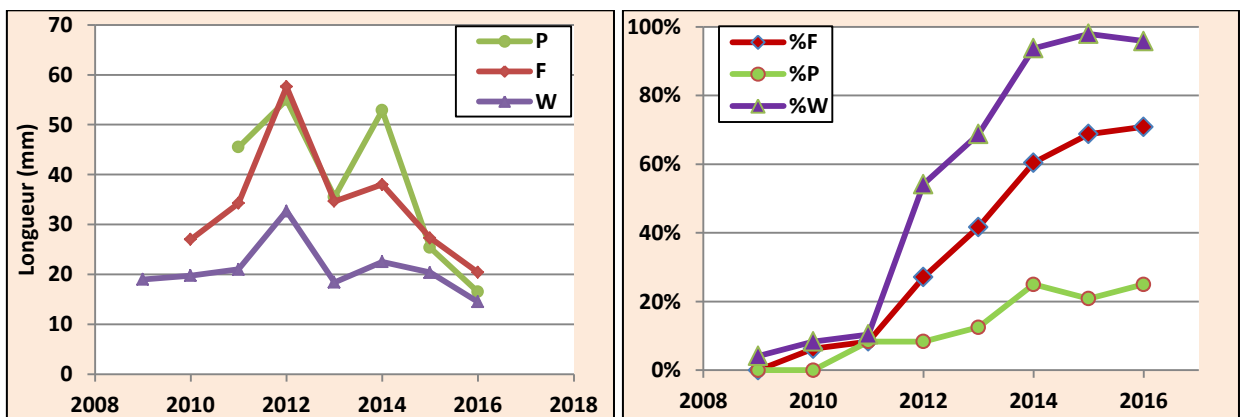


Figure 101. Evolution de la longueur des fleurs mâles des arbres-échantillons de pin pignon en France au cours de la période (2009 – 2016) pour les principales, les faibles et les fortes branches

La croissance de fleurs mâles pour les arbres-échantillons de pin pignon dans la région de Djebel Ouahch est moins développée comparativement avec les peuplements de pin pignon dans la région de Provence-Alpes-Côte d'Azur en France dans les différents axes (faibles, forts, hauts et bas).

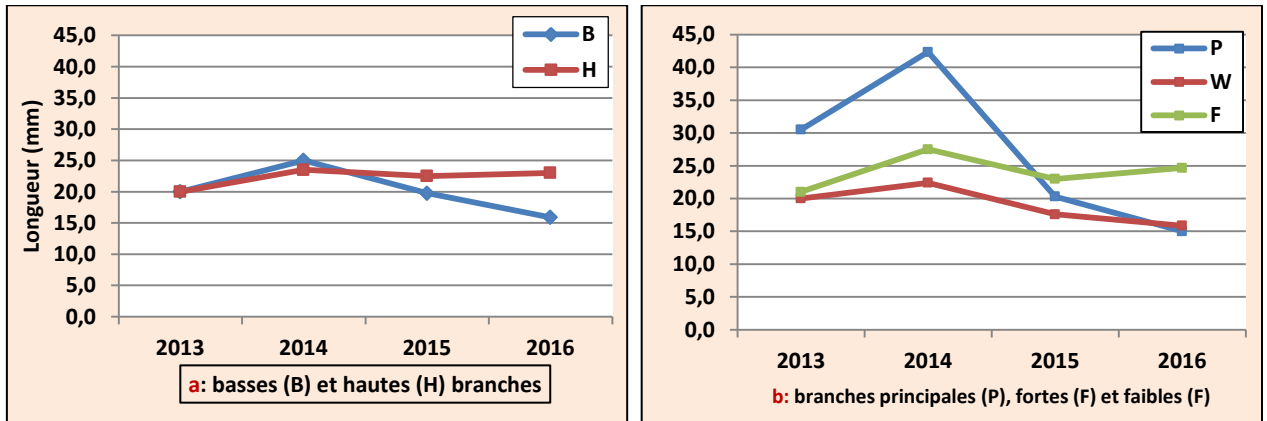


Figure 102. Evolution de la longueur des Fleurs mâles des arbres-échantillons de pin pignon dans la région de Djebel Ouahch au cours des années, **a**: basses et hautes branches; **b**: branches principales, fortes et faibles

5.1.3. Longueur d'aiguilles

Au cours des années d'observation détaillée (2013-2016), la longueur d'aiguilles de pin pignon est plus développée en 2013 pour les principaux rameaux comparativement à des rameaux forts et faibles et dans les hautes branches par rapport aux faibles branches.

L'année 2016, elle donne des aiguilles courtes et peu nombreuses dans la région de Provence-Alpes-Côte d'Azur, par contre, une bonne croissance des aiguilles est observée en 2016 dans la région de Djebel Ouahch (Figures 103, 104).

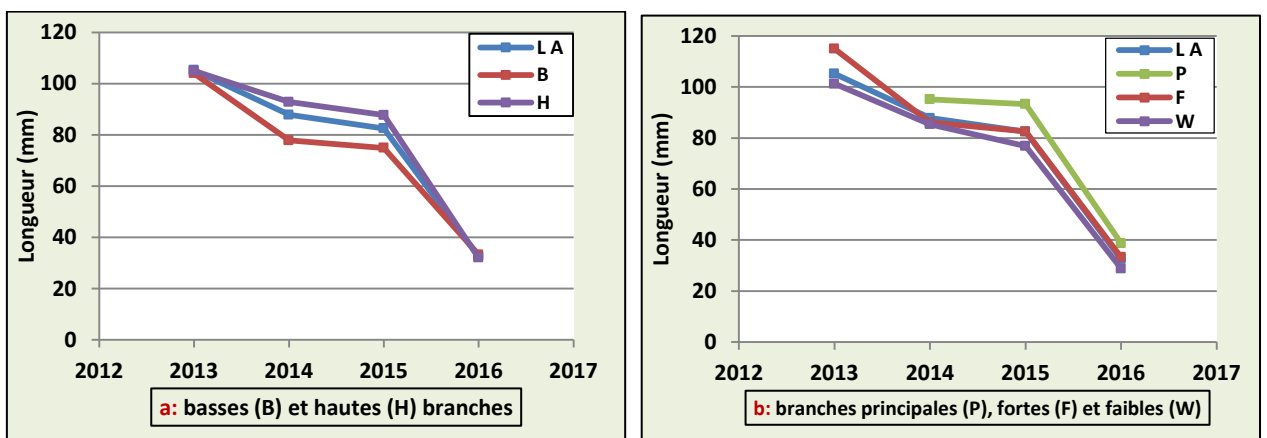


Figure 103. Evolution de la longueur d'aiguilles des arbres-échantillons de pin pignon en France au cours de la période (2013 – 2016), **a**: basses et hautes branches; **b**: branches principales, fortes et faibles

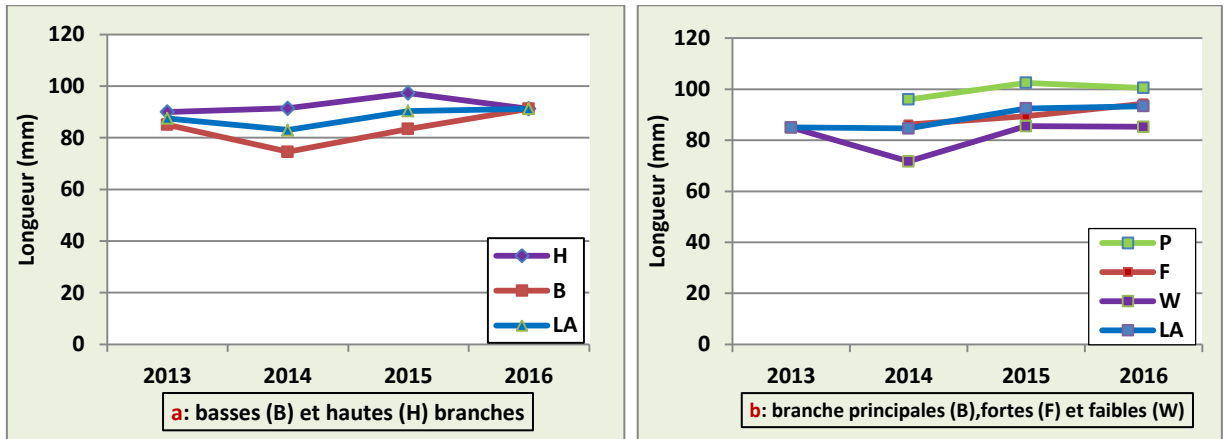


Figure 104. Evolution de la longueur d'aiguilles des arbres-échantillons de pin pignon dans la région de Djebel Ouahch au cours des années, **a**: basses (B) et hautes (H) branches; **b**: branches principales, fortes et faibles

5.1.4. Nombre de branches

Au cours des années, une décroissance remarquable du nombre de branches d'une année à l'autre. Un fort taux d'avortement de branches et rameaux a été observé depuis 2015/2016.

Une partie de cette décroissance est directement liée à l'affaiblissement des arbres au cours de la dernière période. Elles ont été surtout estivales ou hivernales et ont touché les rameaux faibles et les branches basses. Elles se sont accélérées depuis 2008 et 2011 sur les branches basses.

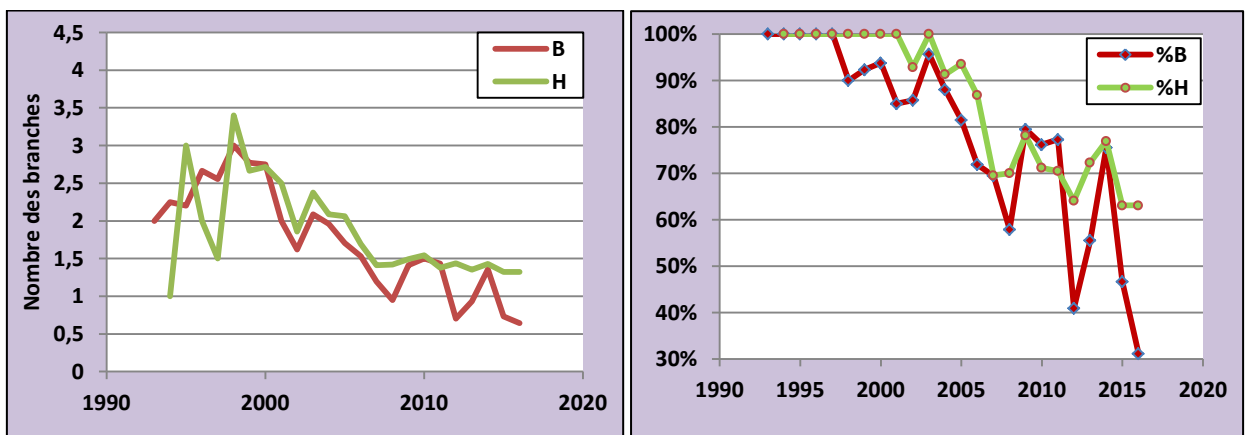


Figure 105. Evolution de nombre des branches des arbres-échantillons de pin pignon en France au cours de la période (1993 – 2016) pour les basses et les hautes branches

Un fort taux d'évolution de branches a été observé pour les principaux rameaux avec un pourcentage élevé.

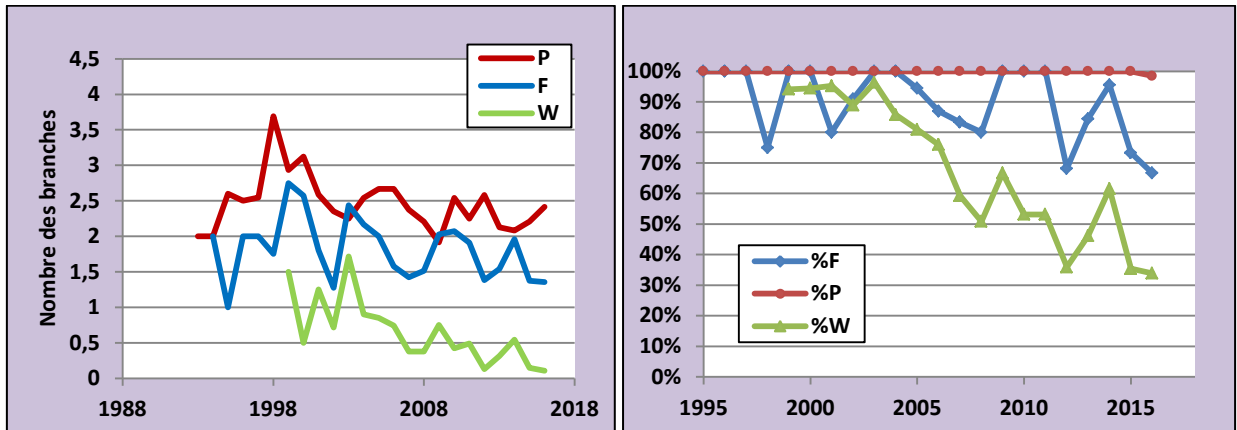


Figure 106. Evolution de nombre des branches des arbres-échantillons de pin pignon en France au cours de la période (1993 – 2016) pour les principales, les fortes et les faibles branches

La figure 107 montre une décroissance remarquable des nombres des futures branches des peuplements de pin pignon dans la région de Djebel Ouahch durant les années. Un fort taux d'avortement de branches a été noté au cours des dernières années.

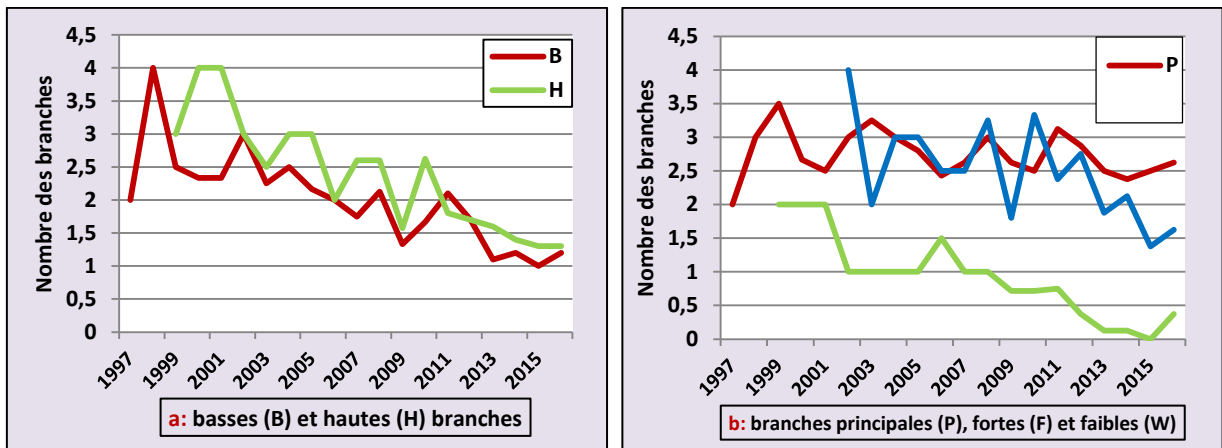


Figure 107. Evolution de nombre des branches des arbres-échantillons de pin pignon dans la région de Djebel Ouahch au cours de la période (1997-2016), a: basses et hautes branches; b: branches principales, fortes et faibles

5.1.5. Nombre de cônes

Une autre partie a touché les axes principaux vigoureux du milieu bas ou du haut du houppier qui ont donné des cônes. Ces axes ont fortement ralenti leur croissance derrière les cônes, au point de perdre leur dominance et même fréquemment de mourir.

Le taux de la productivité de cônes ayant été très faible en 2001 – 2006/2007 et même en 2016. Ce dernier est plus élevé au niveau des hauts rameaux comparativement aux rameaux bas.

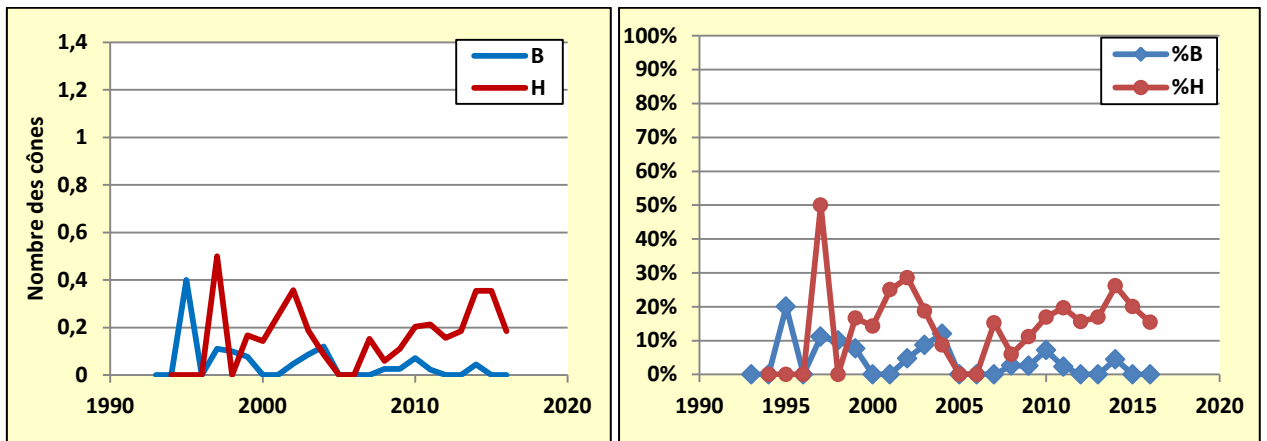


Figure 108. Evolution de la productivité de cônes des arbres-échantillons de pin pignon en France au cours de la période (1993 – 2016) pour les basses et les hautes branches

Au niveau des principaux rameaux des arbres de pin pignon, une augmentation considérable de nombre des cônes est obtenue en 2014 comparativement aux faibles et forts rameaux (Fig 109).

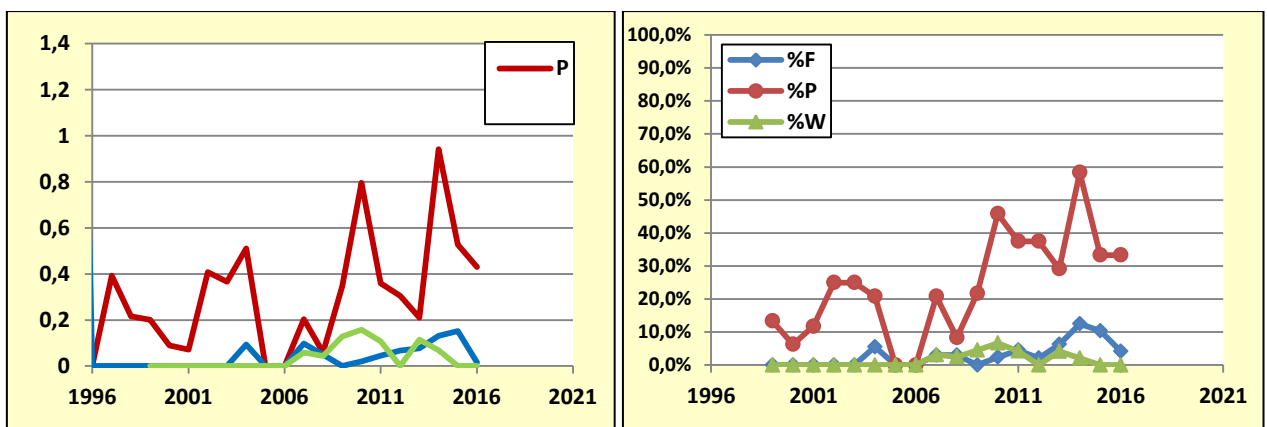


Figure 109. Evolution de la productivité de cônes des arbres-échantillons de pin pignon en France au cours de la période (1996 – 2016) pour les principales, les fortes et les faibles branches

La production des cônes des peuplement de pin pignon dans la région de Djebel Ouahch (Station de Kef lekhel) est notée une augmentation considérable pour les principaleux axes et les hautes branches comparativement avec la région de Provence-Alpes-Côte d'Azur en France.

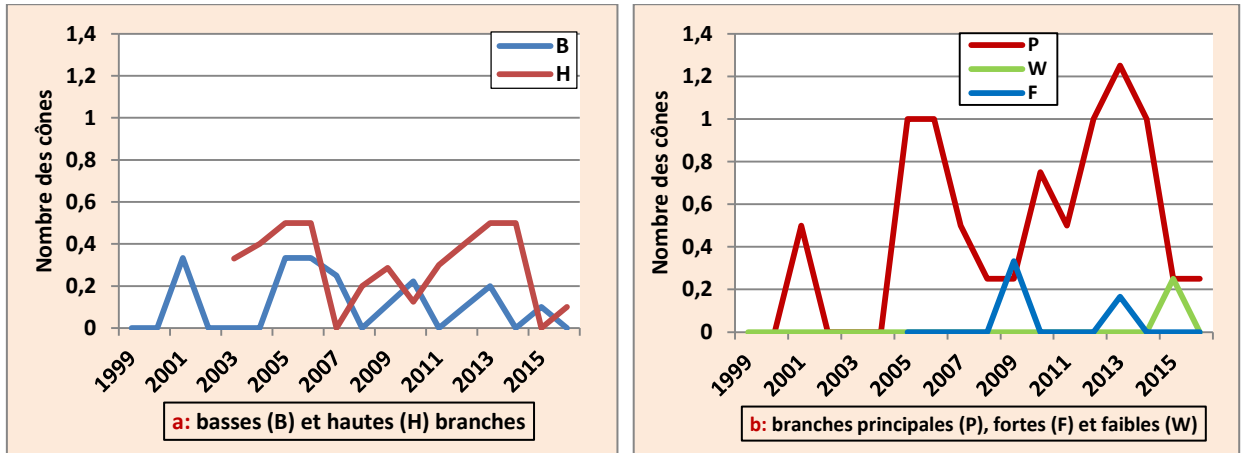


Figure 110. Evolution de la productivité de cônes des arbres-échantillons de pin pignon dans la région de Djebel Ouahch au cours des années, a: basses et hautes branches; b: branches principales, fortes et faibles

La figure 111 montre que la relation entre la longueur de fleurs mâles et la longueur de pousses de l'ensemble de branches mesurées dans chaque arbre s'ajuste par une fonction linéaire.

Le coefficient de détermination $R^2=0.507$, montre que 50.7% des valeurs observées de la longueur sont expliquées par la courbe de tendance.

Les mensurations effectuées sur les arbres ont permis de constater que la plupart des branches atteignent des longueurs des fleurs mâles comprises entre 0 et 120 mm et des longueurs des pousses comprises entre 10 et 160 mm.

Etant donné que, les années 2015/2016 présentent des longueurs des pousses faibles, donc les longueurs des fleurs males sont restées faibles.

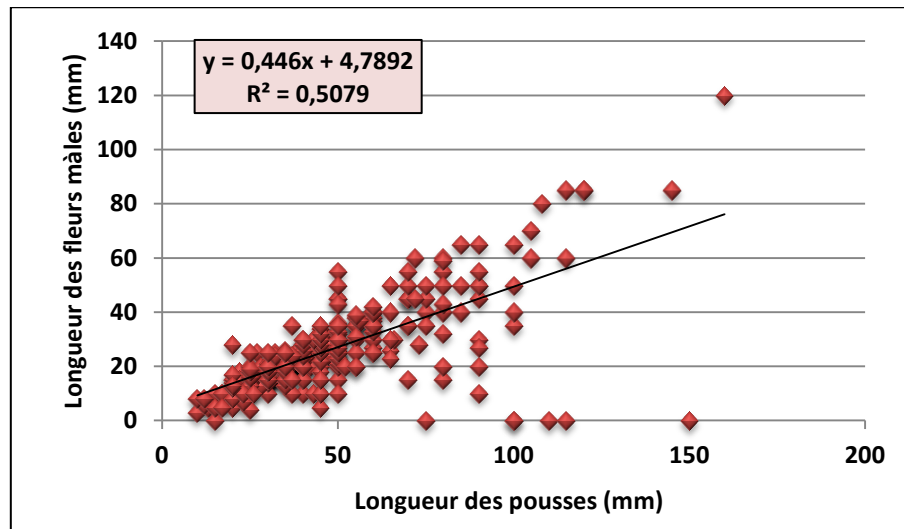


Figure 111. Longueur de fleurs mâles en fonction de longueur de pousses des arbres-échantillons de pin pignon au cours de la période (1993-2016)

La figure 112 montre le nombre des futures branches (NB) en fonction de la longueur de pousses (LP) mesurée dans chaque arbre.

D'après cette figure, le nombre des branches est une fonction positive de la longueur de pousses. Le coefficient de détermination $r^2 = 0.5$ de la courbe de tendance signifie que 50 % des valeurs observées ne sont pas expliquées par la courbe de tendance.

La plupart des pousses atteignent des longueurs comprises entre 10 et 70 mm, avec un nombre des branches comprises entre 0 et 1. Alors que la longueur des pousses est comprise entre 100 et 200 mm avec un nombre important des branches (2 et 3).

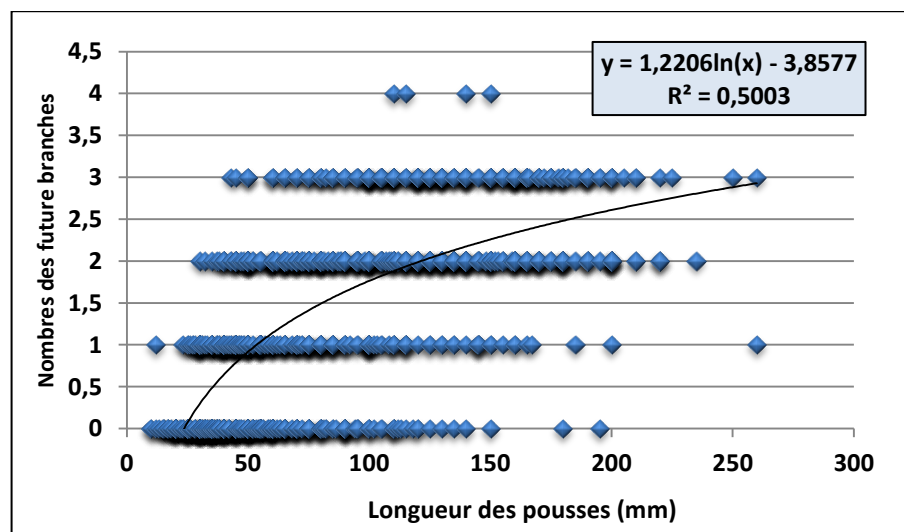


Figure 112. Nombre des futures branches en fonction de longueur des pousses des arbres-échantillons de pin pignon au cours de la période (1993-2016)

Comme la montre la figure 113, la plupart des pousses atteignent de longueur comprises entre 10 et 200 avec un nombre des cônes nuls. En suite, un nombre important des cônes (2) dans quelques pousses qui atteignent des longueurs comprises entre 85 et 195 mm.

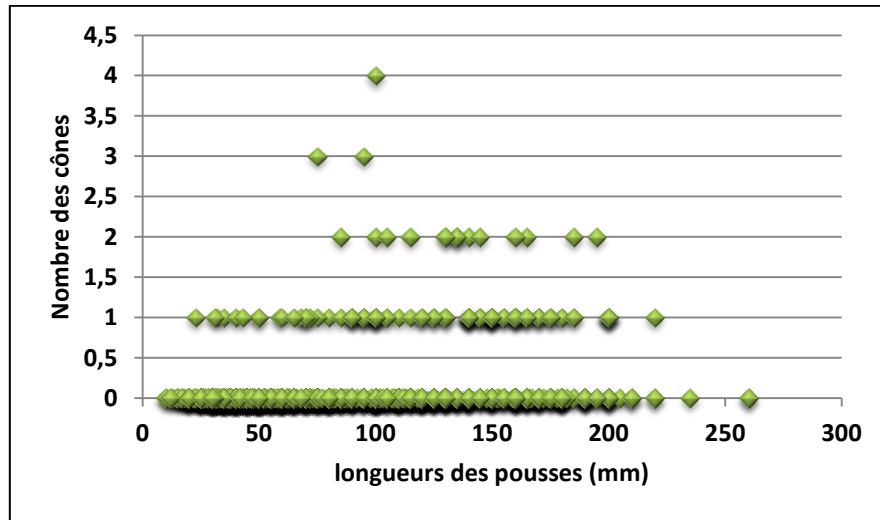


Figure 113. Nombre de cônes en fonction de longueur de pousses des arbres-échantillons de pin pignon au cours de la période (1993-2016)

5.2. Relation entre les différents paramètres de croissance étudiés

D’après le tableau suivant, la longueur des fleurs mâles est négativement corrélé avec le nombre des branches ($r = -0.643$) et la longueur des pousses ($r = -0.538$). Cette dernière variable est corrélée positivement avec le nombre des futures branches ($r = 0.896$).

Tableau 58. Matrice de corrélations des variables étudiés

Variables	LF	NB	NC	LA	LP
LF	1	-0.643	0.299	0.511	-0.538
NB		1	-0.121	-0.459	0.896
NC			1	0.353	0.032
LA				1	-0.440
LP					1

Le tableau 59 donne les valeurs propres, les pourcentages de variation expliquée par chacun des cinq axes retenus, ainsi que les pourcentages cumulés ; on voit bien que le premier axe explique à lui seul 56.649% de la variation totale des variables initiales.

Les deux premiers axes expliquent ensemble 79.754%, les trois premiers axes expliquent 90.042%, donc ces trois axes résument au mieux l'information apportée par les variables étudiés.

Tableau 59. Résultats de l'ACP des cinq axes à partir des variables mesurées

	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
Valeur propre	2,832	1,155	0,514	0,413	0,085
Variabilité (%)	56,649	23,105	10,288	8,261	1,696
% cumulé	56,649	79,755	90,043	98,304	100,000

F1: 1^{er} Composante (où axe) principale ; F2: 2^{ème} Composante (où axe) principale ; F3: 3^{ème} Composante (où axe) principale ; F4: 4^{ème} Composante (où axe) principale ; F5: 5^{ème} Composante (où axe) principale.

La figure 114 fournit des valeurs propres en fonction des rangs de toutes les composantes principales. Ce graphique montre bien l'importance décroissante des différentes composantes principales.

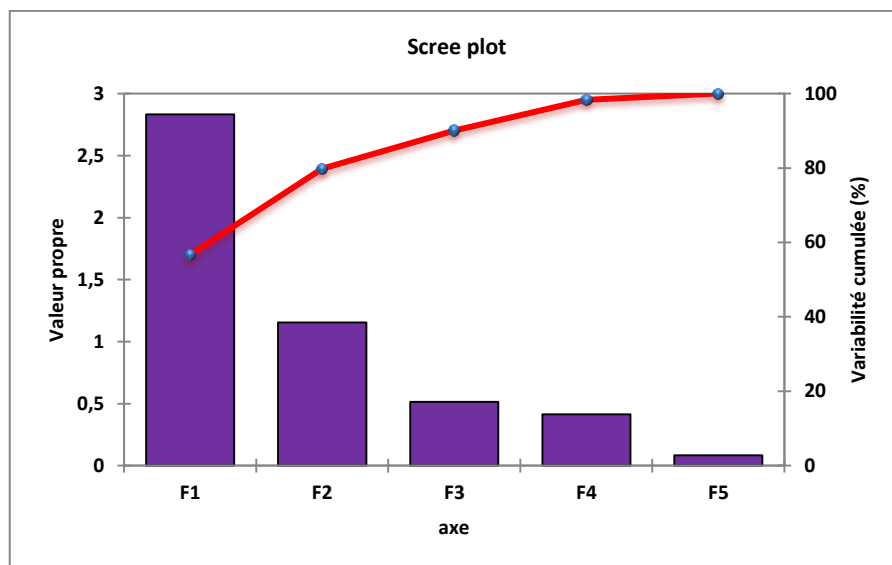


Figure 114. Histogramme des valeurs propres en fonction des rangs des axes principaux

Les corrélations entre les variables initiales et les deux premières composantes retenues, ainsi que les corrélations carrées correspondantes sont reprises dans le tableau 60.

Si on examine les résultats du tableau 59, on constate que le premier axe contient à lui seul 56,64% de l'information apportée par l'ensemble des variables initiales, est constitué

essentiellement par les variables: LF, NB, LA et LP puisque la proportion de la variance prise en considération par l'axe 1 pour chacune de ces 4 variables initiales est d'une façon générale supérieure à 50%. L'axe 2 qui contient 23,10% de l'information est formé par la variable NC.

Tableau 60. Valeurs des corrélations carrées des variables initiales avec les deux premières composantes principales

Variables	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
LF	0,672	0,016	0,037	0,275	0,001
NB	0,818	0,081	0,029	0,029	0,044
NC	0,101	0,761	0,080	0,057	0,001
LA	0,519	0,114	0,367	0,000	0,000
LP	0,723	0,184	0,002	0,052	0,039

L'affinité des différents variables étudiés est confirmée par l'analyse en composantes principales (ACP), elle met en évidence l'influence des paramètres de croissance étudiés sur les peuplements de Pin pignon dans la région de Provence-Alpes-Côte d'Azur en France. En effet, deux groupes homogènes sont dégagés par l'ACP. Le premier groupe (G1) situé sur le côté positif de l'axe 1 du cercle des corrélations présentant des affinités étroites des paramètres de croissance NB et LP avec les années 1993/2007; le deuxième groupe (G2) est situé toujours sur le même axe du cercle des corrélations présentant une affinité entre les paramètre NC, LA, LF et les années 2008/2016.

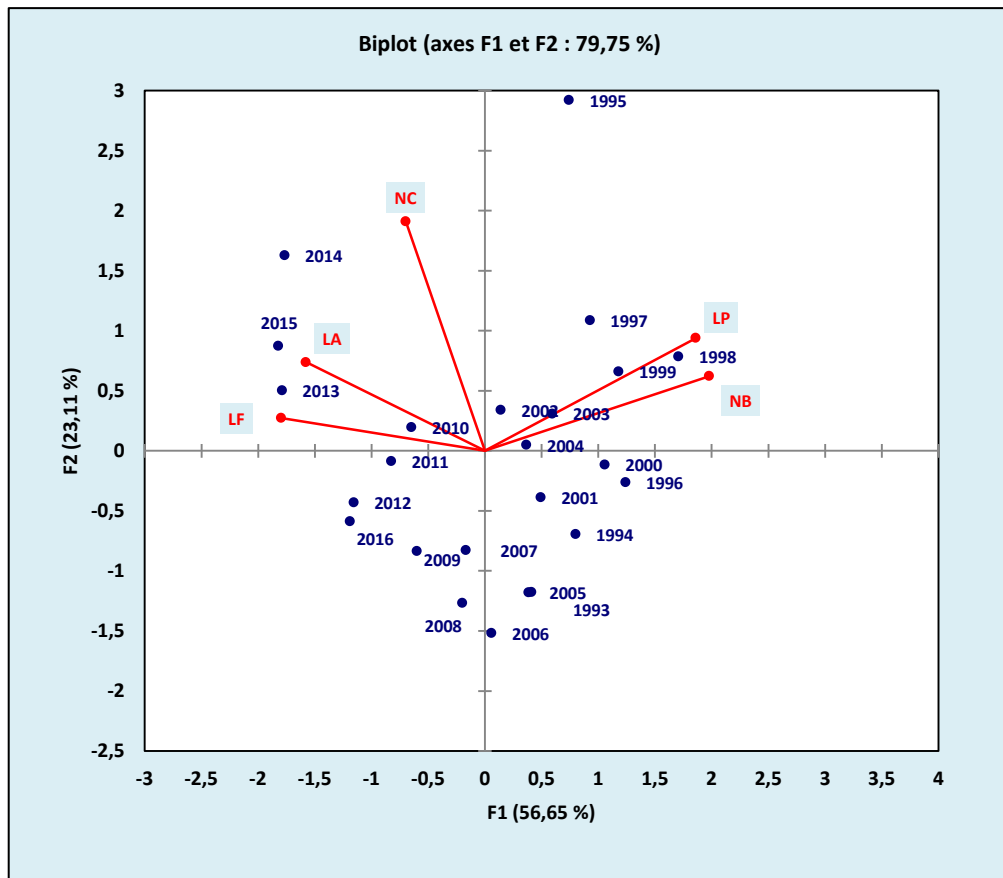


Figure 115. Représentation graphique des variables étudiées dans plan factoriel 1-2

La recherche des groupes homogènes des années étudiées en utilisant le lien simple, la distance carrée de Pearson et un niveau de similarité de 80% a permis d'observer trois groupes. Ces groupes ont été déterminés à partir des moyennes des données sur les différentes variables de croissance. Les différents groupes obtenus sont donnés par la figure 116 et le tableau 61.

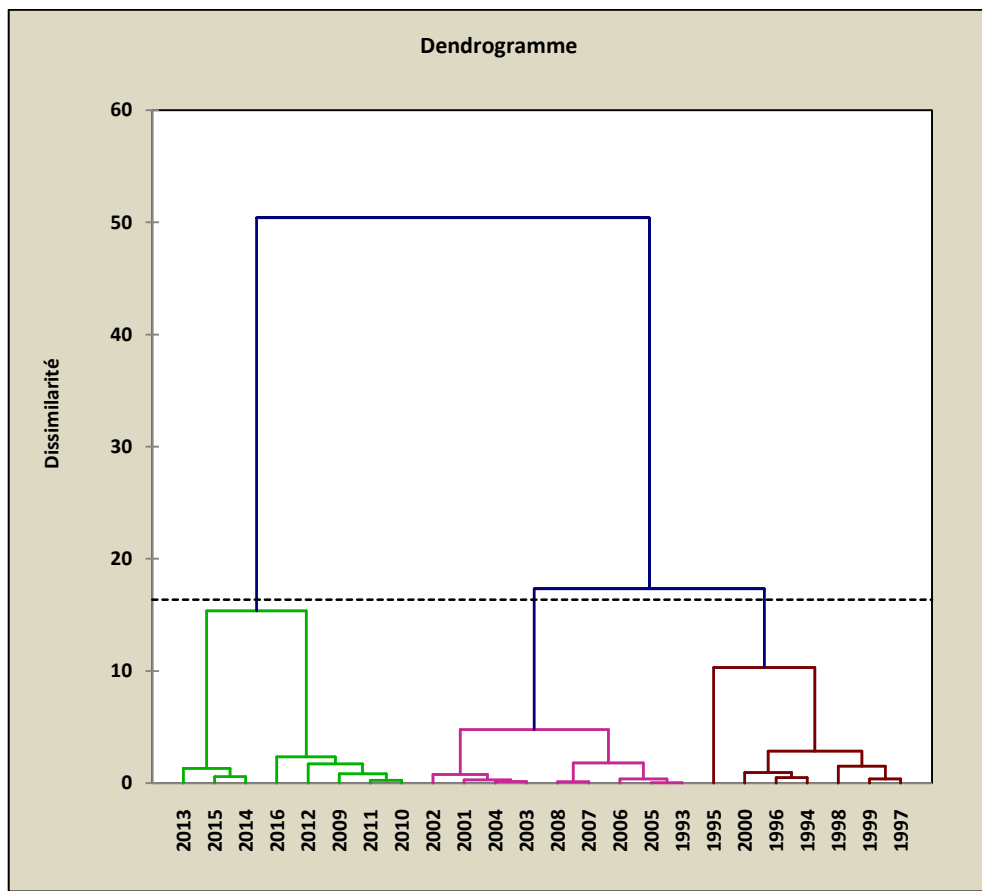


Figure 116. Dendrogramme du regroupement des années étudiées

Tableau 61. Groupes obtenus par l'analyse hiérarchique

Années	Groupe homogènes
1993 - 2009/2016	1
2001/2008	2
1994/2000	3

5.3. Discussion

La première partie de ce travail a été axée sur le recueil d'observations phénologiques sur les peuplements de pin pignon, principalement en France et en Algérie.

La phénologie du pin pignon a été observée durant les vingt ans 1996/2016. Des mesures de croissance ont été effectuées sur les peuplements dans la région de Provence-Alpes-Côte d'Azur d'une part, et dans la région de Djebel Ouahch (Kef lekhel) d'un autre part.

Une croissance potentiellement continue sur toute l'année. Même si elle est ralentie en hiver, cette croissance est significative sur les axes principaux et vigoureux: elle peut atteindre plusieurs centimètres entre année et l'autre, et on a vu qu'elle aboutissait au développement avancé des boutons floraux.

Les mensurations effectuées sur les arbres échantillons ont permis de constater qu'il y a une décroissance remarquable de la longueur de pousses, d'aiguilles et de fleurs mâles au cours des années 2001/2008 (les années de gel et de sécheresse). Dans la région de Djebel Ouahch, la longueur de pousses et le nombre des futures branches sont développées contrairement au cours des années pour les rameaux hauts et bas. Les axes principales présentent une production de cônes élevée par rapport aux deux paires axes secondaires (fortes et faibles branches).

L'année 2016 donne des aiguilles courtes et peu nombreuses dans la région de Provence-Alpes-Côte d'Azur, par contre, une bonne croissance des aiguilles est observée dans la région de Djebel Ouahch à Constantine.

Le climat particulièrement chaud de dernières années (2015-2016) a provoqué l'apparition et le développement des fleurs mâles de Pin pignon. L'exclusion de pluie a diminué le nombre annuel de cycles de croissance des pousses et la durée de ces cycles. Elle a aussi diminué la vitesse de croissance d'aiguilles.

La période estivale ou hivernale a touché les rameaux faibles et les branches basses. Elles se sont accélérées depuis 2008 et 2011 sur les branches basses.

L'allongement des pousses, la phénologie de la floraison, l'épaississement des branches et le développement des aiguilles et des cônes ont été suivis pendant quatre ans chez de pin pignon greffés dans une plantation située en Espagne centrale. L'influence des conditions environnementales sur la croissance et la régulation de la floraison est étudiée sur le Pin pignon méditerranéen en tant que producteur de graines. Différents modèles basés sur les sommes des températures (degrés jours) ont été comparés afin de caractériser les stades phénologiques et l'influence de la température sur la croissance des pousses et des cônes. Des

modèles de régression non-linéaire ont pu être estimés reliant la longueur relative de la pousse préformée et le diamètre relatif des cônes avec l'échelle de temps thermique. Une corrélation significative est établie la pluviométrie du mois de juin et la croissance des aiguilles et la croissance entre épaisseur des branches de l'année courante ou avec la longueur des pousses et la floraison portée l'année suivante. Des modèles phénologiques de la variation entre années concordent avec des observations réalisées sur des Pins pignons matures non greffés (Mutke et al. 2002).

Pardos et al. (2003) avaient observé une croissance débutant en janvier sur 15% de branches de pin d'Alep greffés en verger à graines irrigué toute l'année dans le sud de l'Espagne.

Selon Venetier et al. (2011), Le pin d'Alep n'est pas le seul concerné par l'apparition d'une croissance hivernale. Durant l'hiver 2010, ils ont noté de tels polycyclismes tardifs courts chez le pin maritime, lui-même polycyclique, mais aussi chez deux espèces réputées monocycliques à l'âge adulte: le Pin sylvestre et le pin pignon.

L'activité hivernale du pin d'Alep a eu des conséquences négatives sur sa croissance: malgré l'intérêt des cycles tardifs pour accroître le nombre de ramification, et donc la future surface foliaire potentielle, les avortements par dégâts de gel et attaques parasitaires sur ces jeunes pousses ont fait perdre un temps précieux au printemps, obligeant à repartir sur des axes inférieurs et moins vigoureux (Venetier et al. 2011).

En Europe, la collection d'observations phénologiques a connu une attention croissante pendant le XIXème siècle et de longues séries de débourrement et de floraison sont disponibles. Dans un même temps, l'enregistrement systématique du climat s'est mis en place. Il est intéressant de lier ces deux sources, afin de comprendre les liens entre le climat et le cycle annuel des plantes.

L'analyse des relations entre phénologie et climat a permis de construire des modèles phénologiques permettant de prévoir les dates de réalisation des phénophases. Les modèles de prédiction du débourrement sont souvent employés afin d'estimer les risques de dégâts causés par les gelées tardives. La plupart de ces modèles ne prennent en compte que l'influence de la température (Differt, 2001).

Selon Hesselbjerg-Christiansen et al. (2007); Il y a une forte interaction entre pluie et températures dans la réponse du pin d'Alep au changement climatique. Des pluies abondantes accroissent l'effet favorable de la hausse des températures, en permettant une croissance prolongée donnant des cycles supplémentaires au printemps et en automne. Inversement, des

pluies limitées ou simplement normales combinées avec une hausse de température accentuent fortement le stress hydrique estival, qui se traduit par une croissance et un nombre de cycles réduits. Or les scénarios climatiques prédisent unanimement pour la région méditerranéenne une augmentation très importante de la température couplée à une baisse des précipitations. L'épisode 1998-2007, et particulièrement la période 2003-2007, où la température a dépassé de plus de 1°C la moyenne des 30 années précédentes, et où la pluie a été très déficitaire, étaient une bonne répétition générale, et sans doute encore assez clémente, du climat qui attend le pin d'Alep en Provence au milieu du XXI^e siècle. Les dégâts à l'ensemble de l'écosystème, et aux arbres en particulier, ont été considérables (Girard et al. 2010; Vennetier et al. 2010b; Vennetier et al. 2010c).

Selon Khanfouci (2003), les fleurs mâles et les inflorescences femelles de Cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica*), se présentent toujours en position terminale sur respectivement des rameaux courts et des rameaux longs portés par des axes rigoureux. La floraison du Cèdre de l'Atlas est précoce sur l'exposition sud ; Cependant, il n'y a pas de grandes différences entre les deux expositions quant à l'évolution des cônes quelle que soit l'année.

Nedjahi (1988), note que les bourgeons de Cèdre situés sur exposition sud, présentent un débourrement plus précoce.

Conclusion générale

L'objectif principal de ce travail de recherche est de mettre en évidence l'importance de la valorisation du pin pignon (*Pinus pinea L.*) dans la région de Djebel Ouahch.

Les résultats obtenus à partir des paramètres d'analyses sylvicoles, ont montrés un niveau de développement moyen. Ce niveau est généré par une qualité de peuplement stable, une mortalité élevée, un potentiel d'avenir moyen (taux de régénération faible). Ces analyses ont pu ressortir que diverses pressions pèsent sur la forêt de Pin pignon. Par ordre de menaces, les feux, et les coupes illicites sont les premières.

Pour la productivité des cônes et des pignes, Nos résultats ont montré que le nombre moyen de cônes de 3^{ème} et 4^{ème} année est de 154935 cônes d'où un rendement moyen en cônes de 51645 kg pour des arbres dont l'âge moyen est de 40ans. Cependant, un rendement maximal en cônes de 84316 kg est observé dans la station d'El hambli, et un rendement minimale en cône (9825kg) dans la station d'El haddadj.

D'après les propriétés physicochimiques, les sols étudiés sont de formation récente et peu évolués. L'analyse granulométrique révèle qu'ils présentent une texture équilibrée avec deux classes : limoneuse, limono-sableuse, argileuse et limono- argileuse. Du fait de la nature du matériel géologique de ces sols, le calcaire contribue à l'augmentation du pH, à la stabilisation de la matière organique et au ralentissement de l'humification mais il est s'avère le facteur le plus faible dans ces sols. La capacité d'échange cationique est cependant modérée du fait des teneurs faibles en argile et en matière organique.

Le suivi de l'état morphologique; physiologique des essences sous un stress environnemental est essentiel pour une meilleure productivité des cultures.

Concernant les paramètres morphologiques, l'effet du stress thermique est très hautement significatif pour la plupart des variables analysées. En effet, nous avons constaté que le meilleur résultat obtenu sur la croissance en hauteur, la croissance racinaire, la biomasse aérienne et même racinaire est observé chez les semis durant la saison printanière. Par contre les conditions climatiques sévères de la saison hivernale induisent une réduction de la vitesse d'allongement et de croissance aérienne et souterraine avec diminution de biomasse.

Les analyses biochimiques de la proline, des sucres solubles, des protéines, des enzymes et de la chlorophylle, effectuées après l'application des traitements thermiques (hautes et basses températures), permettent de mieux comprendre les fluctuations de ces marqueurs biochimiques et leur circulation dans les semis de Pin pignon. Parmi ces résultats :

- Le dosage de la proline a montre que les basses et les hautes températures appliquées ont entrainé l'accumulation de cet acide aminé chez les semis de Pin pignon. Cette accumulation s'accroît au fur et à mesure que le niveau de stress devient plus sévère.
- Les sucres solubles ont aussi connu une augmentation de la concentration en réponse au stress thermique. Cette augmentation est très remarquable au niveau des aiguilles que les autres organes.
- En plus de l'accumulation de ces deux osmolytes, les semis de pin pignon ont accumulé des protéines totales au niveau des aiguilles et des racines. Selon le traitement thermique appliqué et la nature de l'organe.
- Pour la chlorophylle, les hautes et les basses températures entraînent une chute progressive des pigments chlorophylliens. Cette diminution s'accroît avec l'intensité du traitement thermique appliqué.
- Les teneurs élevées de l'activité de la catalase et la peroxydase à -10°C , témoignent d'une stratégie adaptative au stress.

Pour les marqueurs biochimiques, le pin pignon réagit positivement et fortement à la température 50°C pour les températures chaudes et -6°C à -10°C pour les températures froides. On peut dire que le Pin pignon est adapté aux variations thermiques extrêmes enregistrées dans la région de Djebel Ouahch avec un éventail thermique compris entre -10°C et 50°C .

L'ensemble des résultats, montre que l'intensité de stress hydrique et thermique est significative pour toutes les variables analysées. Les semis de pin pignon sont aptes à accumuler les différents osmolytes dans les différents organes en réponse au stress combiné. L'accumulation des sucres solubles est bien marquée pour le témoin à une température de 38°C . Cette accumulation est essentielle chez les aiguilles. Les osmo-régulateurs comme les sucres et la proline jouent un rôle important dans l'ajustement et la stabilisation osmotique des cellules des végétaux. L'accumulation de la proline est observée au niveau des aiguilles et des racines par rapport aux tiges. Le niveau N1 indique une réponse rapide vis-à-vis de la contrainte hydrique, alors que l'augmentation de la proline est très significative dans les racines des semis à la contrainte thermique à 38°C au niveau N1 et 44°C au niveau N2 (55%). Pour le témoin, l'accumulation de la chlorophylle (a) et (b) est plus élevée au niveau des aiguilles avec un maximum de 50°C .

Au niveau de la phénologie, le changement climatique se traduit chez le pin pignon essentiellement par un décalage temporel du démarrage et du développement des cycles de

croissance à cause des températures élevées, au printemps, de plus en plus précoces et en automne de plus en plus tardives; un retard du développement des cycles d'automne à cause du stress hydrique et thermique excessifs ou prolongés en été; ces cycles n'arrivant pas à terminer leur développement avant l'hiver, et restant sans aiguilles.

Un accroissement des pluies semblent homogénéiser la phénologie au sein du houppier, la différence entre rameaux forts et faibles étant moins importante.

Les peuplements de pin pignon de la zone de Djebel Ouahch âgés de 40 ans en moyenne, doivent faire l'objet d'une sylviculture appropriée à savoir pratiquer des dégagements éclaircies dans les stations de Ben yakoub et El hambli ; des élagages et des éclaircies périodiques de 8 à 10 ans dans les autres stations. En respectant scrupuleusement la densité des peuplements qui doit être en moyenne de 100 tiges/ha.

En vue de valoriser le développement des peuplements de pin pignon et la production de pignes dans le massif de Djebel Ouahch ; Il est utile de s'inspirer du modèle espagnole pour appliquer une sylviculture adaptée et pratiquer des reboisements avec des semis greffés sur le pin d'Alep pour une meilleure tolérance au stress.

Références bibliographiques

A

Abgrall. J.F., Soutrenon. A. (1991). La forêt et ses ennemis. Editeur: CEMAGREF, 399 p.

Adili. B. (2012). Croissance, fructification et régénération naturelles des peuplements artificiels de Pin pignon (*Pinus pinea L.*) au nord de la Tunisie. Thèse de doctorat, Université Carthage. 116-164 p.

Aebi H. (1984). Catalase in vitro. *Methods in Enzymology*, 105: 121-128 pp.

AFNOR. (2003). Qualité du sol – Détermination de la distribution granulométrique des particules du sol – Méthode à la pipette. NF X 31-107. Paris (France).

AFNOR. (1999). Qualité des sols – Méthodes chimiques – Détermination de la capacité d'échange cationique (CEC) et des cations extractibles. NF X 31-130. Paris (France).

Agrimi. M et Ciancio. O. (1993). Le Pin pignon (*Pinus pinea L.*). *Silva Mediterranea*. (Italy). Rome, 155 p.

Ahas. R. (1999). Long-term phyto-, ornitho- and ichthyophenological time-series analyses in Estonia. *International Journal of Biometeorology* 42:119-123.

Ahas. R., Aasa. A., Menzel. A., Fedotova. V. G., and Scheifinger. H. (2002). Changes in European spring phenology. *International Journal of Climatology* 22:1727-1738.

Akman. Y., Barbero. M., Quezel. P. (1978). Contribution à l'étude de la végétation forestière d'Anatolie méditerranéenne. 1ère partie. *Phytocoenologie*. Fac. Sci. Univ. Ankara, Turquie. 5(1):1-79.

Albouchi. A., Sebe. H., Mezni. M. Y., El Aouni. M. (2001). Influence de la durée d'acclimatation sur l'endurcissement ... la sécheresse d'*Acacia cyanophylla* Lindl. *Ann. For. Sci.* 58 (2001). 521p.

Aloui. A. (1988). Sylviculture du Pin pignon en Tunisie. I.S.P. de Tabarka. Rept. FAO-Silva Mediterranea: Réseau "Pin pignon".

Alaoui-Sossé. B. (1994). Cicle Parmentier, Pierre Dizengremel and Paul Barnola. Rhythmic growth and carbon allocation in *Quercus robur*. *Starch and sucrose. Plant physiol. Biochem*, 32 (3): 331-339 pp.

Alexandrian. (1986). Le choix des essences de reboisements en région méditerranéenne Française : un exemple de liaison station – production. CEMAGREF, 5-63 pp.

Alexandrian. D. (1979). Premiers résultats d'un essai dans le périmètre de DFCI du massif de Frontfroide (Aude). *Revue Forestière Française*, 31(6):482-490 pp.

Alpuim. M. (1989). Perspectivas actuais para o melhoramento da *Pinus pinea L.* I.N.I.A., Portugal.

Ammannati. R. (1989). Primi studi sul determinismo genetico del carattere “guscio fragile” dei semi in *Pinus pinea* L. *Annali. Accademia italiana di scienze forestali*, 38: 143-163.

Andriamahazo M. (2003). Contribution à la relance et à la conduite sylvicole de *Cupressus lusitanica* (Cas de la station forestière de Manjakatempo). Mémoire de fin d'étude. Département des Eaux et Forêts. Ecole supérieure des sciences agronomiques. Université d'Antananarivo, 78 p.

Aouiche. C., Bouhidel. S. (2003). Comportement du Chêne liège (*Quercus suber* L.) sur différents substrats de la région de Constantine. Mémoire du diplôme d'ingénieur d'état en Ecologie et Environnement. Université des Frères Mentouri-Constantine, 53p.

Araus. J.L., Slafer. G.A., Reynolds. M.P. and Royo. C. (2002). Plant breeding and drought in C3 cereals: what should we breed for? *Ann. Bot.*, 89: 925-940 pp.

Arnon DI. (1949). Copper enzymes in isolated chloroplasts. *Plant. Physiol.*, 24: 1-15 pp.

Arce De Obieta. C., Sanz Munoz. M. (1981). Vitameiros B6 en semillasde *Pinus pinea* germinantes. *Anales de Edafologia y Agrobiologia.Cons. Sup. Invest. Cient. Madrid*, 40(9/10):1825-1831.

Armenise Porcelli. V., Felicini. G., Liso. R., Macchia. F., Scaramuzzif. (1965) Rapporti fra endosperma ed embrione nella germinazione di *Pinus pinea* L. Nota I: Effetti del grado di maturità del seme. *Giornale Botanico Italiano*, 72:139-147 pp.

Athar. HR., Khan. A., Ashraf. M. (2008). Exogenously applied ascorbic acid alleviates salt induced oxidative stress in wheat. *Environ. Exp. Bot.* 63: 224-231pp.

B

Baccari. V., Ciampi. C., Corti. R., Firenzuoli. A. M., Guerritore. A., Magini. E., Mastronuzzi. E., Ramponi. G., Vanni. P., Zanobini. A.(1968). Ricerche sull'incompatibilità d'innesto nelle conifere. *Annali Accademia Italiana di Scienze Forestali*, Firenze. Vol. XVII: 35-100.

Baccouche. S. (2001). Etude de la contribution des enzymes antioxydantes dans les processus de détoxification de métaux lourds (Ni, Cd) chez le maïs et le tournesol. Thèse de doctorat en physiologie végétale. Université de Tunis El Manar, 237p.

Badawi. M. (2008). Fonctions génomiques de la famille des facteurs de transcription ap2 chez les céréales. *Doctorat en Biologie, Université du Québec à Montréal*, 264p.

Baize. D. (1988). Guide des Analyses Courantes en Pédologie. INRA. (France), 172 p. ISBN: 2-7380- 0075-4.

Baize. D. (2000). Teneurs totales en «métaux lourds» dans les sols français: résultats généraux du programme ASPITET. *Le Courrier de l'Environnement de l'INRA*, 40: 39-54.

Baker. D., Hicke. L., Rexach. M., Schleyer. M., and Schekman. R. (1988). Recon- stitution of SEC gene product-dependent intercompartmental protein transport. *Cell.* 54 :335-344pp.

- Baldini. S., Nardi Berti. R. (1986).** La potatura delle piantagioni di conifere. Monti e Boschi, 6:43-56.
- Barbeito. I. S. (2009).** Structure and natural regeneration in Iberian Pine forests implications for management. Thesis. Universidad Politecnica de Madrid. 166p.
- Barsanti. D., Rombai. L. (1983).** I Lorena imprenditori agrari nella Maremma dell'800: latifondo, gran coltura meccanizzata e mezzadria all'Alberese e alla Badiola. Pp.:541-570. In G. Coppola, "Agricoltura e aziende nel l'Italia centro-settentrionale (SecoliXVI-XIX)" Franco Angeli Editore, Milano.
- Barlow. E.W.R., Boersma. L., Young. J.L.(1976).** Root temperature and soil water potential effects on growth and soluble carbohydrates concentration of corn seedlings. Crop Sci., 16, 59- 62 pp.
- Beaubien. E. G., and Freeland. H. J. (2000).** Spring phenology trends in Alberta, Canada: links to ocean temperature. International Journal of Biometeorology 44:53-59 pp.
- Belabed. S., Soltani. N. (2013).** Acute toxicity of cadmium on *Donax trunculus*: acetylcholinesterase, glutathione Stransferase activities and pattern of recovery. *Eur. J. Exp. Biol*, (3), 54-61 pp.
- Belkhouja. A. (2001).** Evaluation et modélisation de la fructification du Pin pignon (*Pinus pinea L.*) au nord de la Tunisie. Mémoire du diplôme d'ingénieur. Ecole Nationale Forestière d'Ingénieurs. 79p.
- Belkhodja. M., Bidai. Y. (2004).** Analyse de la proline pour l'étude de la résistance d'une halophyte *Atriplex halimus L.* la salinité. *Laboratoire de Physiologie Végétale*. Université Oran , Algérie, 5p.
- Bendjoudi. D., Zouaoui. F., Errahmani. M.B., Bendjeddou. K., Chekir. N. (2013).** Mesure de deux biomarqueurs catalase et malondialdéhyde chez *Perna perna* et *Mytilus galloprovincialis* (*Mollusca, Bivalvia*) suite à une contamination aigüe par *Staphylococcus aureus*. *Travaux de l'Institut Scientifique, Rabat, Série Zoologie*, (49), 19-27 pp.
- Beniken . (2013).** Evaluation de l'effet du stress hydrique et du porte-greffe sur la clémentine *Citrus reticulata* Swingle var (Sidi Aissa). *Journal of applied Biosciences* 71 : 5692-5704 p.
- Ben Khaled. L., Gomez. AM., Ouarraqi. EM., Oihabi. A., (2003).** Physiological and biochemical responses to salt stress of mycorrhized and/or nodulated clover seedlings (*Trifolium alexandrinum L.*). *Agronomie* ,23: 571–80 pp.
- Bensari. M., Calmes. J., Viala. G. (1990).** Régulation du carbone fixé par photosynthèse entre l'amidon et le saccharose dans le feuille de soja:Influence d'un déficit hydrique. *Plant. Physiol. Biochem*, 28 (1) :113-121pp.
- Bezzala. A. (2005).** Essai d'introduction de l'arganier (*Argania spinosa (L) Skeels*) dans la zone de M'doukel et .valuation de quelques param.tres de r.sistance . la s.cherese. M.moire de magisters en sciences agronomiques. Universit. de Batna. 107p.

Biondi. L., Righini. E. (1910). Il pino da pinoli. Hoepli. Milano.

Boisseau. B. (1993). Ecologie du Pin pignon. Coll. "Les cahiers de la forêt méditerranéenne". N,1: 1-26. Groupement d'Aix-en-Provence. Division "Techniques forestières méditerranéennes".

Boncompagni. T. (1952). Alcune ricerche sulla biologia dei semi di *Pinus pinea* L. Tesi di Laurea. Ist. Selvicoltura, Università di Firenze.

Borchert. R. (1983). Phenology and control of flowering intertropical trees. *Biotropica* 15(2): 81-89.

Boudy. P. (1950). Economie forestière Nord-africaine. Tome II, Paris.

Boulfefel. Y. (1979). Le Paradoxe du Djebel Ouahch et la recherche d'un nouvel équilibre Agro-Sylvo-Pastoral. Thèse doctorat, Université Paul Valéry Montpellier 3, 23-25p.

Boyer. W.D. (1974). Longleaf pine cone production related to pollen density. In Proceedings colloquium "Seed yield from Southern pine seed orchards", Macon, Georgia, USA, April 2-3, J. Kraus (Ed), published by Georgia Forest Research Council, 8-14.

Bradford. M.M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein dye binding. *Anal. Biochem*, 72: 248-254.

Bramlett. D. L. (1977). Efficiency of seed production in Southern pine seed orchards. In Proc. 13th lake states forest tree improvement conference, August 17-18, St Paul, MN, USA, USDA For. Serv., 17-25 pp.

Bramlett. D. L. (1974). Seed potential and seed efficiency: In Seed Yield from Southern Pine Seed Orchards Colloquium Proc. John Kraus(Ed). P.1-7. Ga. For. Res. Council., Macon, Ga.

C

Cabanettes. A., Rapp M. (1978). Biomasse, minéralomasse et productivité d'un écosystème à Pins pignons (*Pinus pinea* L.) dulittoral méditerranéen. I. - Biomasse. *Acta Oecologica – Oecologia Plantarum*, Vol. 13(3):271-286.

Calama. R., Montero. G. (2007). Cone and seed production from stone pine (*Pinus pinea* L.) stands in Central Range (Spain). *European Journal of Forest Research* 126: 23-35.

Calama. R., Cañadas. N., Montero. G. (2003). Inter-regional variability in site index models for even-aged stands of stone pine (*Pinus pinea* L.) in Spain. *Annals of Forest Science* 60: 259-269.

Cantiani. M. (1971). Sui rimedi per salvare dal deperimento lapineta litoranea di Cecina. *L'Italia Forestale e Montana*,26(6):214-221pp.

Cantiani. M. (1976). I cedui di Eucalitto (*E. camaldulensis* ed *E.globulus*) nella Sicilia Centrale. *L'Italia Forestale e Montana*, 2(31):33-48.

Castellani. C. (1989). La produzione legnosa e del frutto e ladurata del turno economico delle pinete coetanee di pino domestico (*Pinus pinea* L.) in un complesso assestato a prevalente funzione produttiva in Italia. Annali Istituto Sperimentale Assestamento e Alpicoltura, Vol. XII. Trento.

Castellani. C. (1978-79). Studio sull'incremento diametrico stagionale delle più importanti specie forestali che popolano iboschi italiani. Annali Istituto Sperimentale Assestamento e Alpicoltura, Trento. Vol. 7.

Castelan-Estrada Mepivoseh. (2001). Répartition de la Biomasse chez *Vitis vinifera* L.; Rendement de Conversion du Rayonnement Solaire Global et Co.ts Energétiques. Thèse doctorat. Institut National Agronomique Paris-Grignon. 56p.

Catalan Bachiller. G. (1989). El pino piñonero como productor de fruto en España. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentacion. Instituto Nacional para la Conservacion de la Naturaleza, pp.15.

Cantiani. M. G., Scotti. R. (1988). Le fustaie coetanee di pino domestico del litorale tirrenico: studi sulla dinamica diacrescimento in funzione di alcune ipotesi selvicolturali alternative. Annali Istituto Sperimentale Assestamento Forestale e Alpicoltura - 1988, Trento, 11:1-54 pp.

Cappelli. M. (1958). Note preliminari sulla produzione individuale di strobili in *Pinus pinea* L. L'Italia Forestale e Montana, 13(5):181-203 pp.

Catalan. Bachiller. G. (1989). El pino piñonero como productor de fruto en España. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentacion. Instituto Nacional para la Conservacion de la Naturaleza, 15p.

Cavalli. S., Corsi. F., (1987). Struttura, evoluzione e trattamento di un rimboschimento a Pinie Cipresso sul Monte Argentario. L'Italia Forestale e Montana, 42(1):47-57pp.

Cemagref et l'ONF. (1987). Les vergers à graines du lot et du TARN.

Chance. B., Maehly. S.K. (1955). Assay of catalase and peroxidase. *Methods Enzymol.*, 2, 764-775 pp.

Chabaud. L., Nicolas. L. (2009). Guide des sylvicultures. Pinaies des plaines du Centre et du Nord-Ouest. Office National des Forêts (France), 399 p.

Chaib. G., Benlaribi. M., Hazmoune. T. (2015). Accumulation d'osmoticums chez le blé dur (*triticum durum* desf.) sous stress hydrique. *European Scientific Journal* August, Vol.24 (11) :1857-7881.

Chmielewski, F. M., and Rotzer. T. (2002). Annual and spatial variability of the beginning of growing season in Europe in relation to air temperature changes. *Climate Research* 19:257-264.

Chmielewski. F. M., and T. Rotzer. (2001). Response of tree phenology to climate change across Europe. *Agricultural and Forest Meteorology* 108:101-112.

- Chinnusamy. V., Schumaker. K. and Zhu. J.K. (2004).** Molecular genetic perspectives on cross-talk and specificity in abiotic stress signalling in plants. *J. Exp. Bot.*, 55 (395): 225-236.
- Chinnusamy. V., Zhu. J. and Zhu. J.K. (2006).** Gene regulation during cold acclimation in plants. *Physiologia Plantarum*, 126(1): 52-61.
- Chunyang. L. (2013).** Differences in drought reponses of three contrasting *Eucalyptus microtheca* F. Muell. populations. University of Helsinki. Finland. *Forest Ecology and Management*. 379: 377-385 pp.
- Ciancio. O. (1994).** Tavola cormometrica del pino domestico di Piazza Armerina cresciuto in fustaia coetanea. *L'Italia Forestale e Montana*, 23:136-143pp.
- Ciancio. O., Cutini. A., Mercurio. R., Veracini. A. (1986).** Sulla struttura della pineta di pino domestico di Alberese. *Annali Istituto Sperimentale per la Selvicoltura, Arezzo*. 17:169-236.
- Ciancio. O. (1991).** Prove di sfollamento sui pini mediterranei. *Annali Istituto Sperimentale per la Selvicoltura, Arezzo*. 1:199-268 pp.
- Comps. B., Letouzey. J., Savoie, J.M. (1987).** Phénologie du couvert arborescent dans une chênaie-hêtraie d'Aquitaine. *Annales des Sciences Forestières*, 44. 153-170.
- Cointat. M. (1959).** Observations sur la foliaison du hêtre. *Revue Forestière Française*, 3, 214-217.
- Côme. D. (1992).** Les végétaux et le froid. 600p. Chunyang L, 2013. Differences in drought reponses of three contrasting *Eucalyptus microtheca* F. Muell. populations. University of Helsinki. Finland. *Forest Ecology and Management*. 379: 377-385 pp.
- Cochard. C., Picon. A., Claud. A., Gutknecht. F., Lacroix. L., Coll. P., Balandier. (2003).** Croissance et efficience d'utilisation des ressources du pin sylvestre soumis à une concurrence herbacée.
- Costa .P. (1999).** Réponse moléculaire, physiologique et génétique du pin maritime à une contrainte hydrique. PhD thesis, Université Henri Poincaré Nancy I, F.
- Cornic C. (2007).** Effet de la température sur la photosynthèse. 42p.
- Cornic. G., Ghashghaie. J. (1991).** Effect of temperature on net CO₂ assimilation and photosystem II quantum yield of electron transfer of French bean (*Phaseolus vulgaris* L.) leaves during drought stress. *Planta*. 185: 255-260 pp.
- Critchfield. W.B., Little. E.L. (1966).** Geographic distribution of the Pines of the world. - U.S. Dept. Agric. Forest Service. Miscell. Publ. 991p.

D

- David. J.C. et Grongnet. J.F. (2001).** Les protéines de stress. *INRA Prod. Anim.*, 14(1): 29-40.
- El Mourid, M. 1988. *Performance of wheat and barley cultivars under different soil moisture regimes in semi arid region*. Ph.D. dissertation, Iowa State University Ames USA, 229p.
- Davis. D. L. and W. B. Gilbert. (1970).** Winter hardiness and changes in soluble protein fractions of bermudagrass. *Crop Sci.* 10: 7-9 pp.
- Dawkins. H.C. (1958).** The management of natural tropical high-forest with special reference to Uganda. *Imp. For. Paper 34*, Oxford, Angleterre, 55 p.
- Debazac E. F. (1977).** Manuel des Conifères. E.N.G.R.E.F. Nancy, pp. 172, 79 planches.
- Delpech. R., Dumé. G., Galmiche. P. (1985).** Typologie des stations forestières. Vocabulaire. *Ministère de l'Agriculture. Direction des Forêts. Institut pour le Développement Forestier*, 243p.
- Defila. C. (2001).** Change in growing periods in Switzerland? *Obst- und Weinbau* 137:553-555.
- De Granville. j. J. (1971).** Étude bioclimatique l'archipel des canaries. 30p
- De Philippis. A. (1957-1958).** Pinete di pino domestico. In *Lezioni di Selvicoltura speciale*. Università di Firenze, pp 186-197.
- De Philippis. A. (1949).** I diradamenti boschivi nella scienza, nella sperimentazione, nell'arte culturale. *UniversitariaEditrice*. Firenze.
- Debarr. G. L., Ebel. B. H. (1974).** Conelet abortion and seed damage of shortleaf and loblolly pines by a seedbug, *Leptoglossus corculus*. *Forest Science* 20:165-170.
- Differt. J. (2001).** *Phénologie des espèces arborées. Synthèse bibliographique. Analyse des données du Réseau National de Suivi à long terme des Ecosystèmes Forestiers (RENECOFOR)*. ENGREF - INRA, Nancy.
- Dinus. R.J., Yates. H.O. (1975).** Protection of seed orchards, In *seed orchards*, R. Faulkner (ed), *Forestry Commission Bulletin n° 54*, 58-71.
- Djaziri. A. (1971).** Étude stationnelle du Pin pignon en Italie. *I.N.R.F.*, Tunisie, Variete scientifique. N 9. 94p.
- Djebbar. M., Bencheikh-Lehocine. M., Bakalowicz. M., et Meniai. A.H. (2004).** Identification hydrogéochimique du karst hydrothermal constantinois (Algérie nord-orientale). *Science et Technologie*. 22, pp133-140.
- Dogan. B. (1991).** Stone Pine in Turkey. *Rept. FAO-Silva Mediterranea: Réseau "Pin pignon"*.

Duchaufour. P. (1991). Pédologie, Sol, Végétation, Environnement. Ed. Masson, Paris (France). 289 p. ISBN: 2-225-82421-5.

Drouet. E. (2010). Impact de la température sur la carbonatation des matériaux cimentaires: prise en compte des transferts hydriques. Thèse de Doctorat, École Normale Supérieure de Cachan (France). 260 p.

Durand. R. (1967). Action de la température et du rayonnement sur la croissance. *Annales de Physiologie Végétale*, 9, 5-27 pp.

Dubois. M., Gillesk.L., Hamilton. J., Reberg. A. and Smith. F. (1956). Colorimetric method for determination of sugars and related substance, analytical, chemistry. Vol 28 :14-15.

Dubos. C., Plomion. C. (2001). Drought differentially affects expression of a PR.10 protein, in needles of maritime pine *Pinus pinaster* Ait seedlings. *J Exp Bot* In press.

Duthil. J. (1973). Eléments d'écologie et d'agronomie, T III., Edition J B Baillière, Parais. 656 p.

E

Ebel. B.H. (1974). Cone and seed insects of shortleaf and loblolly pines in the Georgia Piedmont, *In* Seed yield from Southern pine seed orchards, Macon, Georgia, USA, April 2-3, Kraus (ed). *Georgia Forest Resaerch Council*. 26-33 pp.

Eclerc. J.C. (1999). Ecophysiologie végétale. *Publication de l'université Saint Erime*, 280p.

Edwards. D.G.W. (1986). Cone predictrion, collection, and processing. In Proceedings Conifer tree seed in the inland mountain west symposium, Missoula, Montana, USA, August 5-6, 1985, R.C. Shearer (ed), USDA., Forest Service, General technical report INT 203: 78-102.

Ehrlen. J., Munzbergova. Z., Diekmann. M., Eriksson. O. (2006). Long-term assessment of seed limitation in plants: results from an 11-year experiment. *Journal of Ecology* 94: 1224-1232.

Eig. A. (1931). Les éléments et les groupes phytogéographiques auxiliaires dans la flore palestinienne. Dahlem bei Berlin.

El-Hadef El Okki. M. (2016). Etude des relations lumbricidae – elements traces métalliques en conditions naturelles et contrôlées. Cas de l'espèce aporrectodea trapezoides. Thèse de Doctorat en Sciences. Université des frères Mentouri-Constantine. 64p.

Eskelinen. A., Virtanen. R.(2005). Local and regional processes in low-productive mountain plant communities: the roles of seed and microsite limitation in relation to grazing. *Oikos* 110: 360-368 pp.

F

Fady. B., Fineschi. S., Vendramin. G. (2004). Euforgen Technical guidelines for genetic conservation and use for Italian stone pine (*Pinus pinea*). International Plant Genetic Resources Institute, Rome, Italy. 6p.

Fenaroli. L., Gambi. G. (1976). Alberi. Dendroflora Italica. Museo Tridentino di Scienze Naturali, Trento, pp. 126-132.

Feinbrun. N. (1959). Spontaneous Pineta in the Lebanon. Bulletin of Resources Council of Israel, 7:132-153.

Ferrari. L. (1950). Alcune ricerche sulla biologia dei semi di *Pinus pinea* L. e *P. halepensis* Mill. Tesi di Laurea. Ist. Selvicoltura. Università di Firenze.

Filigheddu. P. (1962). Contributo allo studio degli apparati radicali di *Pinus pinea* L. nelle sabbie dunose del litorale settentrionale sardo. Studi Sassaesi. Annali Fac. Agr. Univ. Sassari, 10: 1-18 pp.

Firat. F. (1943). Fruit and timber production in four stone pine stands and guidelines for their management. (Monografia in Turco, con riassunto in Tedesco). Ankara.

Fletcher. A.M. (1992). Flower, fruit and seed development and morphology. In seed manual for forest trees, A.G. Gordon (ed), London, Forestry Commission, bulletin 83: 59-70.

Foster. B. L., Tilman. D. (2003). Seed limitation and the regulation of community structure in oak savanna grassland. *Journal of Ecology* 91: 999-1007.

Fontanel. J.L. (1979). Etude des influences climatiques sur les potentialités de la production forestière. *Mémoire - INRA de Champenoux- Centre National de Recherches Forestières*.

Foyer. CH., Vanacker. H., Gomez. L.D. and Harbinson. J. (2002). Regulation of photosynthesis and antioxidant metabolism in maize leaves at optimal and chilling temperatures: review. *Plant Physiology and Biochemistry*, 40: 659-668 pp.

Foyer. CH., Noctor. G. (2003). Redox sensing and signaling associated with reactive oxygen in chloroplast, peroxisomes and mitochondria. *Physiol. Plant.* 119: 355-364 pp.

Francini. E. (1958). Ecologia comparata di *Pinus halepensis* Mill., *Pinus pinaster* Sol. e *Pinus pinea* L. sulla base del comportamento del gametofito femminile. Annali Accademia Italiana di Scienze Forestali, Firenze, Vol. VII:107-173.

G

Gausсен. H. (1960). Les gymnospermes actuelles et fossiles. Trav. Lab. Forest. Toulouse 2:1. sect.6. Genre *Pinus*, Toulouse, 272 p.

Gagnard. J., Huguet. C., Ryser. J.P. (1988). L'analyse du sol et du vegetal dans la conduite de la fertilisation, le contrôle de la qualité des fruits. Secrétariat générale OILB/SROP, Edition-Diffusion ACTA., 87p.

- Galoux. A., (1966).** La variabilité génécologique du hêtre commun (*Fagus silvatica* L.) en Belgique. *Station de Recherches des Eaux et Forêts Groenendaal - Hoeilaart. Travaux Série A.*p 11, 123.
- Galoux. A., Schnock. G., Grulois, J. (1967).** La variabilité phénologique et les conditions climatiques. *Bulletin de la Société Royale de Botanique de Belgique*, 100. 309-314.
- Ganatsas. P., Tsakalimi. M., Thanos. C. (2008).** Seed and cone diversity and seed germination of *Pinus pinea* in Stofylia site of the Natura 2000 Network. *Biodiversity and Conservation* 17: 2427-2439.
- Gatteschi. P., Milanese. B. (1988).** Condizioni della vegetazione del litorale toscano a sud di Livorno. *Monti e Boschi*, 39(2):5-10.
- Gatteschi. P., Milanese. B. (1989).** Condizioni della vegetazione del litorale toscano a nord di Livorno. *Monti e Boschi*, 40(3):17-24.
- Garchi. S., Ben Mansoura. A. (1999).** Influence de l'ombrage sur la structure et l'accroissement du pin d'Alep à Jbel Mansour. *Annales de l'INRGREF* 3 : 89-102.
- Girard. JF., Legchenko. A., Boucher. M. (2005).** Stability of MRS signal and estimation of data quality. *Near Surface Geophysics*, 3: 187–194. DOI: 10.3997/1873-0604.2005013.
- Girard. F., Vennetier. M., Ouarmim S., Caraglio. Y., Misson. L. (2010).** Polycyclism, a fundamental tree growth process, decline with recent climate change. The example of *Pinus halepensis* Mill. In *Mediterranean France. Trees - Structure and function*, vol. 25, n° 2, p. in press.
- Giannini R., Raddi P., Vannella S. (1978).** Statistical efficiency in *P. pinaster* and *P. pinea* progeny test heritability estimate and its reliability. *Genetica Agraria. Univ. Bari.*, 32(3/4):335-341.
- Giulini. P., Rascio. N. (1973).** Osservazioni sulla solubilizzazione dei granuli di aleurone durante le prime fasi della germinazione di semi di *Pinus pinea*. *Pubbl. Centro Sper. Agric. For., E.N.C.C., Roma.*12:91-98.
- Giacomini. V. (1968).** Un albero italico nel paesaggio italico (*Pinus pinea* L.). *L'Italia Forestale e Montana*, 23(3):101-116.
- Giordano. E. (1967).** Qualche osservazione sul l'ecologia del *Pinus pinea* L. *Pubbl. Centro Sper. Agric. For.*, 9: 97-105. E.N.C.C., Roma.
- Giordano. G. (1990).** Classificazione delle specie legnose per destinazione d'impiego. *Sviluppo del Legno S.R.L. - Ministero del l'Agricoltura e delle Foreste, Direzione Generale per l'Economia Montana e per le Foreste.*
- Gnangle. P.C. (2005).** Parcs à Karite (*Vitellaria paradoxa*) (Gaertn. C.f.) (*Sapotaceae*) au Benin: importance socio-culturelle, caractérisations morphologique, structurale et regeneration naturelle. *DEA en aménagement et gestion des ressources naturelless (Agroforestrie).* 113p.

Gonzales-Vasquez. E. (1947). Selvicultura. Libro primero: Fundamentos naturales y especies forestales. Los bosques ibericos. Segunda edic. Editorial Dossat, S. A., Madrid.

Gordo. F. J., Mutke. S., Gil. L. (2000). La producción de piña de *Pinus pinea* L. en los montes públicos de Valladolid. Primer Simposio sobre el pino piñonero (*Pinus pinea* L.). Valladolid. 2: 269-277.

Gómez. L., Allona. I., Ramos. A., Núñez. P., Ibáñez. C., Casado. R. and Aragoncillo. C. (2005). Molecular responses to thermal stress in woody plants. *Invest Agrar: Sist. Recur. For.*, 14(3):307-317.

Gonzalez. L., Olmedo. J., Cordova. H., Aragon. C.E., Pinad Rivas. M., Rodreguez. R., (2005). Effet d'un analogue de Brassinosteroide sur plantules de FHIA 18 expos.es . Un stress thermique. Information Vol 14 N,01, 18-19pp.

Gradi. A. (1961). Raccolta e preparazione delle sementi forestali. Monti e Boschi, 10:505-517 pp.

Greene. D.F., Johnson. E.A. (2004). Modelling the temporal variation in the seed production of North American trees. *Canadian Jurnal of Forest Research* 34: 65-75 pp.

Grouzis. M. et Sicot. M. (1980). Une méthode d'étude phénologique de populations d'espèces ligneuses sahéliennes. Influence de quelques facteurs écologiques. A.C.C. Lutte contre l'aridité dans l'Oudalan (Haute Volta) OGRST-ORSTOM, IlpA.

Gross. K.L., Mittelbach. G.G., Reynolds. H.L. (2005). Grassland invasibility and diversity: Responses to nutrients, seed input, and disturbance. *Ecology* 86: 476-486 pp.

Guessoum. A. (2001). L'effet de l'irrigation sur la salinité du sol dans la region de Saada-Biskra. Thèse ing, Agro. Université Batna. 50p.

Guyon. J.P. (1986). Influence du climat sur l'expression des composantes de la croissance en hauteur chez le pin noir d'Autriche (*Pinus nigra* Arn. ssp nigricans). Ann. Sci. For. (43) 2, 207-226 pp.

H

Haldimann. P. (1999). How do changes in temperature during growth affect leaf pigment composition and photosynthesis in *Zea mays* genotypes differing in sensitivity to low temperature *Journal of Experimental Botany*, **50**: 543-550 pp.

Hare. P.D., Cress. W.A., Van Staden. J. (1998). Dissecting the roles of osmolyte accumulation during stress. *Plant cell and environment* 21:535-553 pp.

Hazelton. RA., Murphy. BW. (2007). Interpreting Soil Test Results: What Do All the Numbers Mean CSIRO Publishing, Collingwood (Australia). 152 p. ISBN-13: 978-0-64309-225-9.

Hernández. J. A., Jiménez. A., Mullineaux. P., Sevilla. F.(2000). Tolerance of pea (*Pisum sativum* L.) to long-term salt stress is associated with induction of antioxidant defences”, *Plant, Cell & Environment*, vol. 23 (8), 853-862 pp.

Hermanin De Reichenfeld. L., Paoletti. I.(1992). Piano di gestione del complesso demaniale di S. Arcangelo (LT) (1992 - 2001).

Henttonen. H., Kanninen. M., Nygren. M., Ojansuu. R. (1986). The maturation of *Pinus sylvestris* seeds in relation to temperature climate in northern Finland. *Scandinavian Journal of Forest Research* 1:243-249.

Heller.R. avec la collaboration de R. Esnault Clance. (1989). Physiologie végétale. T1. Nutrition.

Hesselbjerg-Christiansen. J., Hewitson. B. (2007). Regional Climate Projection. In: IPCC (2007) *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller eds., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. chap 11, 847-940 pp.

Hopkins. W. G. (2003). Physiologie végétale. 2ème édition, 460-464 pp.

Houde. M., Daniel. C., Lachapelle. M., Allard. F., Lalibert. S., Sarhan. F. (1995). Immunolocalization of freezing –tolerance –associated proteins in the cytoplasm and nucleoplasm of wheat crown tissues. *Plant. J.* 8: 583-593pp.

I

Ibrahim. M., Berger A., Rapp m. (1979). Détermination de la transpiration au moyen de l'eau tritiée. Méthodologie et validité des résultats. Applications à *Pinus pinea* L. *Plant and Soil*, 52:291-301.

Ibrahim. M., Rapp M., Berger A., Lossaint P. (1980). Évaluation de la transpiration d'un peuplement de *Pinus pinea* L. en condition naturelle. *Acta Oecologica - Oecol. Plant.*, Vol. 1,15, (4):395-407.

Ibrahim. M., Rapp M. (1979). Variation spatio-temporelle de la salinité du sol d'un peuplement de Pin pignon (*Pinus pinea* L.) du littoral méditerranéen. *Ecologia Mediterranea*, 4:49-60.

Ibrahim. M. (1979). Recherches sur la dynamique et le bilan de l'eau d'un écosystème à Pin pignon (*Pinus pinea* L.) sur sable dunaire. Thèse de doctorat ès Sciences, Univ. Sci. Tech. Languedoc, Montpellier, pp. 256.

IFN. (2001). Caractéristiques générales de pin pignon. Inventaire forestier national, pp111-112.

Ijaz. A., Tasneem. K., Ashfaq. A., Shahzad. M. A. B., Zuhair. H., Amjed. A. (2012). Effect of seed priming with ascorbic acid, salicylic acid and hydrogen peroxide on emergence, vigor and antioxidant activities of maize. *African Journal of Biotechnology* Vol. 11(5), 1127-1132.

ISO. (1998). Soil quality – Determination of dry bulk density. N° 11272. ISO., Geneva (Switzerland), 10 p.

ISO. (1995b). Soil quality – Determination of total nitrogen – Modified Kjeldahl method. N° 11261. ISO., Geneva (Switzerland), 4 p.

ISO. (1995a). Soil quality – Determination of carbonate content – Volumetric method. N° 10693. ISO., Geneva (Switzerland), 7 p.

ISO. (1994). Soil quality – Determination of the specific electrical conductivity. N° 11265. ISO., Geneva (Switzerland), 4 p.

J

Jackson. M. T. (1966). Effects of microclimate on spring flowering phenology. *Ecology*, 41: 401-415.

K

Kanouni- Rached. M. (2013). Adaptation du chêne liège (*Quercus suber* L.) aux conditions extrême de température. Thèse de doctorat, Université des Frères Mentouri, Constantine (Algérie), 84p.

Kameli. A., Losel. DM. (1996). Growth and sugar accumulation in durum wheat plants under water stress. *New Phytol.*, 132:57-62pp.

Keeling. C. D., Chin. J. F. S., and Whorf. T. P. (1996). Increased activity of northern vegetation inferred from atmospheric CO₂ measurements. *Nature* 382:146-149 pp.

Khanfouci. M. S. (2003). Contribution a l'étude de la fructification et de la régénération du Cèdre de l'atlas (*Cedrus atlantica* M.) dans le massif du Belzma. Thèse de magister en science forestières. Université Colonel El Hadj Lakhdar, Batna. 60p.

Khaldi. A. (2009). Etude de la croissance et des productions du Pin pignon (*Pinus pinea* L.) en relation avec les facteurs écologiques, sylvicoles et génétiques en Tunisie. Thèse de doctorat. Sciences Agronomiques. Université Carthage.

Knight. H. and Knight. M.R. (2001). Abiotic stress signalling pathways: specificity and crosstalk. *Trends Plant Sci*, 6: 262- 267.

Korichi. N., Megrrouche. R. (2003). Impact des incendies sur la régénération du Chêne vert (*Quercus ilex*. L) et du pin d'Alep (*Pinus halepensis*. Mill) de la forêt domaniale du Chettabah (*Wilaya de Constantine*). Mémoire du diplôme d'ingénieur d'état en Ecologie et Environnement, Université des frères Mentouri-Constantine. 45-49 pp.

Kolotelo. D., Van Steenis. E., Peterson. M., Bennett. R., Trotter. D., Dennis. J.(2001). Seed handling guidebook. B.C. Min. For., Tree. Improv. Br, 106p.

Kozinski. G. (1986). Megagametogenesis, fertilization, and embryo development in *Larix decidua*. *Canadian Journal of Forest Research* 16: 1301-1309

Kramer. G.F., Norman. H.A., Krizek. D.T. (1991). Influence of UV-B radiation on polyamines, lipid peroxidation and membrane lipids in cucumber. *Phytochem.*, 30, 2101-2108.

L

Laala. A. (2009). Comportement des semis de pin d'Alep sous contrainte thermique. Thèse de Magistère, Université des Frères Mentouri Constantine, 107p.

Laala. A, Rached-Kanouni. M, Alatou. D.J. (2013). Les variations thermiques saisonniers et leurs impacts sur le comportement ecophysiologicals des semis de pin d'alep. *European Scientific Journal August*, Vol.24 (9) :1857-7881.

Laouar. S. (1977). Caractéristiques éco physiologiques et aspects de l'économie de l'eau de l'olivier (*Olea europea L.*) et de l'oranger (*Citrus sinensis L. Obsbeck*). Thèse de doctorat d'état, Université de Paris-VII, 57-59pp.

Labadie. J. (1983). Étude des exigences écologiques du Pin pignon en région méditerranéenne française. Mém. 3eme année E.N.I.T.E.F, CEMAGREF. Aix-en Provence.

Langridge. P., Paltridge. N. and Fincher. G. (2006). Functionnal genomics of abiotic stress tolerance in cereals. *Briefings in Functional Genomics and Proteomics*, 4(4): 343-354.

Lamnaouer. D. (2002). Détermination des espèces en danger dans le Parc National de Toubkal. Programme de l'UICN en Afrique du Nord : Phase III Etat d'avancement.

LCA. (Laboratoire de Conseils et d'Analyses), 2008. Guide pratique : comprendre et utiliser les analyses agro-environnementales. ENITA., Bordeaux (France), 25 p.

Lebourgeois. F. ; Pierrat. J.C. ; Perez. V. ; Piedallu. C. ; S. C. ; Ulrich E. (2008). Déterminisme de la phénologie des forêts tempérées françaises : Etude sur les peuplements du RENECOFOR. *Revue Forestière Française*, vol. 60, n° 3. 323-343 pp.

Leadem. C. L., Gillies. S. L., Yearsley. H. K., Sit. V., Spittlehouse. D. L., Burton. P. J. (1997). Field studies in seed biology. British Columbia Ministry of Forests, Victoria, BC.

Lehout. (2008). Limite thermique et adaptation de Pin pignon dans la région de Constantine. Thèse de Magistère. Université des Frères Mentouri, Constantine 1 (Algérie), 51p.

Ledig. F. T. (1981). The influence of genotype and environment on dry matter distribution in plants. In : HUXLEY, P. A, ed. Plant research and agroforestry, Proc Consultative Meeting, International council for research in agroforestry, Nairobi, 427 . 54p.

Léger. A. (2010). Analyse fonctionnelle d'AtMYB30, un régulateur transcriptionnel impliqué

dans la mort cellulaire hypersensible chez *Arabidopsis thaliana*. Doc.Univ., Université III – Paul Sabatier. Toulouse, 302 p.

Little. E.L., Critchfield W.B., (1969). Subdivision of the genus *Pinus* (Pines).U.S. Dept. Agric. Forest Service, Misc. Publ, 1144:1-51pp.

Liso. R. (1965). Prove di germinazione di semi di *Pinus pinea* albuio. Giornale Botanico Italiano, 72:148-152. FELICINI G. P., 1965 - Rapporti dimensionali tra radice, ipocotilee cotiledoni nella germinazione del seme di *Pinus pinea* L. Gior.Bot. Ital., 72:133-138 pp.

Liphschitz. N., Lev-Yadun. S., Rozen. A., Waisel. Y. (1982). On the Origin of some Israeli Conifers. La Yaaran, 32: 2p.

Liphschitz. N., Lev-Yadun. S. (1986). Cambial activity of evergreen and seasonal dimorphics around the Mediterranean. IAWA Bull., 7:145-153 pp.

Lin. C. and Thomashow. M. F. (1992). DNA sequence analysis of a complementary DNA for cold-regulated *Arabidopsis* gene cor 15 and characterization of COR 15 polypeptide. Plant physiol. 99: 519-525 pp.

Loullou. ZE. (1987). Analyse des reboisements en pin pignon dans la région de Mostaganem : Contribution à l'étude dendrométrique. Mém. Ing. Ins.Agro. Alger, 90p.

Lobell. D.B. and Asner. G.P. (2003). Climate and Management Contributions to Recent Trends in U.S. *Agricultural Yields*. *Science*, 299: 999-1032.

Loisel. R. (1976) Place et rôle des espèces du genre *Pinus* dans la végétation du sud-est méditerranéen français. *Ecologia Mediterranea*, 10(2):131-152 pp.

M

Mac Kinney G. (1941). Absorption of light by chlorophyll solution .*Biol.Chem.*, 140.315-322.

Mahi. Z., Dedaldechamp. F., Maurousse. L., Lemoine. R., Belkhodja. M. (2015). Etude de la Peroxydation Lipidique (MDA) et l'Activité Antioxydative (POD) Chez Deux halophytes: *Atriplex halimus* L. et *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt sous l'Effet du Sel. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, Vol. 10, 450-458 pp.

Majourhat. K., Baaziz. M. (2004). Diversité et caractéristiques des peroxydases foliaires du palmier dattier. *Congrès international de Biochimie, maraakech, Maroc* : 153-156 pp.

Magini. E. (1955) Sulle condizioni di germinazione del pino d'Aleppo e del pino domestico. *L'Italia Forestale e Montana*,10(3): 106-124.

Malaisse. F. (1964). Contribution à l'étude des hêtraies d'Europe occidentale. Note 4 : quelques observations phénologiques de hêtraies en 1963. *Bulletin de la Société Royale de Botanique de Belgique*, 97. 85-97 pp.

Mancini. F. (1954). I terreni sulle formazioni sabbiose di Orbetello. *Annali Accademia Italiana di Scienze Forestali*, Firenze, Vol. II: 33-50.

- Mancini. F. (1956).** Contributo alla geopedologia della Macchia di Migliarino (Pisa). Annali Accademia Italiana di Scienze Forestali, Firenze, Vol. V:301-331.
- Magini. E. (1966).** Grafting Umbrella pine (*Pinus pinea* L.) in the open. VI Congr. Forest., Madrid.
- Marguery. P. (1992).** Contribution à l'étude et à l'amélioration de la croissance du fruit chez le pommier (*Malus domestica* Dork. Cv Golden delicious). Thèse de doctorat. Université d'Amiens, 177p.
- Mauriès. M (1998).** Module de production et gestion du système fourrager' cahier luzerne, C.E.E.
- Mckenzie. J. S., Paquin. R., and Duke. S. H. (1988).** Cold and heat tolerance. In: Hanson, A, Barnes, D. K., and Hill, R. R., Jr (eds) Alfafa and alfafa improvement. Agronomy monograph No. 29, ASA, Madison, WI. 259-302 pp.
- Mefti. M., Abdelguerfi. A., Chebouti. A. (2000).** Etude de la tolérance à la sécheresse chez quelques populations de *Medicago truncatula* (L.) Gaertn. Options Méditerranéennes HEAM , 173-176 pp.
- Mébarki. A. (1984).** Ressources en eau et aménagement en Algérie. Le bassin du Kebir-Rhumel. OPU., Alger, 302 p.
- Mébarki. A. (2005).** Hydrologie des Bassins de l'Est Algérien: Ressources en eau, aménagement et environnement. Thèse de Doctorat, Faculté des Sciences de la terre, Géographie et Aménagement du Territoire, Université Mentouri de Constantine, 360 p.
- Menzel. A., and Fabian. P. (1999).** Growing season extended in Europe. Nature 397:659.
- Menzel. A., Sparks. T. H., Estrella. N., Koch. E., Aasa. A., Ahas. R., Alm-Kubler. K., Bissolli. P., Braslavska. O., Briede. A., Chmielewski. F. M., Crepinsek. Z., Curnel. Y., Dahl. A., Defila. C., Donnelly. A., Filella. Y., Jatzka. K., Mage. F., Mestre. A., Nordli. O., Penuelas. J., Pirinen. P., Remisova. V., Scheifinger. H., Striz. M., Susnik. A., Van Vliet. A. J. H., Wielgolaski. F. E., Zach. S., and Zust. A. (2006).** European phenological response to climate change matches the warming pattern. Global Change Biology 12:1969-1976.
- Mercurio. R. (1989).** Notes sur la sylviculture du Pin pignon (*Pinus pinea* L.) en Italie. Reunion sobre Selvicultura, Mejora y Produccion de *Pinus pinea*. Session on "Sylvicultural practices on *Pinus pinea* stands.
- Mirov. N. T. (1967).** The genus *pinus*. Ronald Press. New york.
- Miller. N. (1993).** Expression d'une thermotolérance au niveau de la fonction du photosystème II. Mémoire présenté à l'université du Québec pour la maîtrise en biophysique, 159p.
- Montero. L. (1989).** Los pinares de la Meseta de Castilla y Leon. Reunion sobre Selvicultura, Mejora y Produccion de *Pinus pinea*. Madrid - Valladolid, 11 y 12 de Diciembre, 1989. INIA - Comision de las Comunidades Europeas.

Monneveux. P., Belhassen. E. (1997). The diversity of drought adaptation in the wide. *Plant Growth Regulation* 20 : 85-92 pp.

Monneveux. P., Nemmar. M., (1986). Contribution à l'étude de la résistance à la sécheresse chez le blé tender *Triticum aestivum* L. et chez le blé dur *Triticum durum*, Desf. : Étude de l'accumulation de la proline au cours du cycle de développement. *Agronomie*, 583-590 pp.

Montero Gonzales. G., Gomez Ioranca. J.A. (1989). Problemas selvícolas del *Pinus pinea* L en España. Reunion sobre Silvicultura, Mejora y Produccion de *Pinus pinea*. Madrid - Valladolid, 11 y 12 de Diciembre, 1989. INIA - Comision de las Comunidades Europeas.

Morin. X ; Chuine. I. (2007). Modification de la phénologie, des risques de gel et de la répartition des essences ligneuses nord-américaines suite au changement climatique. *Rendez-vous Techniques ONF*, vol. Hors série n°3. 15-20 pp.

Mori. G. ; Imanishi. H. El Sakanishi. Y. (1990). Effect of temperature on flowering on *Lycoris squamigera* Maxim. and *L. radiata* Herb. *J. Japn Soc. Hort. Sei.* 59(2) : 311-382

Moulopoulos. CH. (1964). Lectures in Silviculture. Part I and IV. Thessaloniki.

Moussouris. Y., Regato. P. (1999). Forest Harvest: An Overview of Non-Timber Forest Products in the Mediterranean Region. WWF. 25p.

Muscolo. A., Sidari. M., Mallamaci. C., Attinà. E. (2007). Changes in germination and glyoxylate and respiratory enzymes of *Pinus pinea* seeds under various abiotic stresses. *Journal of Plant Interactions* 2: 273-279 pp.

Mutke. S., Gordo. J., Climent. J., Gil. L. (2002). Shoot growth and phenology modelling of grafted Stone pine (*Pinus pinea* L.) in Inner Spain. *INRA, EDP Sciences, Ann. For. Sci.* 60 (2003): 527-537pp.

Mutke. S., Gordo. J., Climent. J., Gil. L. (2003). Shoot growth and phenology modelling of grafted Stone pine (*Pinus pinea* L.) in inner Spain. *Annals of Forest Science* 60: 527-537 pp.

Mutke. S., Gordo. J., Gil. L. (2005). Variability of Mediterranean Stone pine cone production: Yield loss as response to climate change. *Agricultural and Forest Meteorology* 132: 263-272 pp.

Myneni. R. B., Keeling; C. D., Tucker. C. J., Asrar. G., and Nemani. R. R.(1997). Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature (London)* 386: 698-702 pp.

N

NAFC (North American Forestry Commission). (1987). Cone and seed diseases of North American conifers, J.R. Sutherland, T. Miller and R. Salinas Quinard (eds), 77p.

Nedjahi. A. (1988). La cédraie du Chréa (Atlas Blideen). Phénologie, productivité, régénération. Thèse de doctorat. Université Nancy I : 184 p.

Netting. A. (2002). pH, abscisic acid and the integration of metabolism in plants under stressed and non-stressed conditions. II. Modifications in modes of metabolism induced by variation in the tension on the water column and by stress. *Journal of Experimental Botany*, 53(367):151-173 pp.

Nguyen.Querens. A., Derré. N., Lamant. A., Seillac. P. (1995). Tolérance au chlorure de Sodium et sélectivité Na/K chez 3 races géographiques de pin maritime *Pinus pinaster* Ait. *Ann Sci For* 52: 465-475 pp.

Njoku. E. (1963). Seasonal periodicity in the growth and development of some forest trees in Nigeria. *Journal of Ecology*, 51: 55-63 pp.

O

O'Brien. S. T., Hubbell. S. P., Spiro. P., Condit. R., Foster. R. B. (1995). Diameter, height, crown, and age relationships in eight neotropical tree species. *Ecology* 76: 1926-1939.

Ober. S., Sharp. P. (1994). Polyphasic chlorophylla fluorescence transients in plants and cyanobacteria. *Photosynthesis research* 29:147-150 pp.

Owens. J.N., Molder. M. (1984). The reproductive cycle of lodgepole pine. Province of British Columbia, Ministry of Forests, Inf. Serv. Br., Victoria, 29p.

Owens. J.N., Blake. M.D. (1986). Production de semences forestières. Petawawa National Forestry Institute, Canadian Forest Service, Information Report. PI-X653F, 177p. + Annexes.

Owens. J.N., Baldet. P., Héois. B., Ginisty. C. (2006). Reproduction sexuée des conifères et production de semences en vergers à graines. 570p.

Owens. J. N., Catalano. G., Bennet; J. S. (2001). The pollination mechanism of Western white pine. *Canadian Journal of Forest Research* 31: 1731-1741pp.

P

Padula. M. (1979). Criteri naturalistici dei rimboschimenti nellaregione mediterranea italiana. *Informatore Botanico Italiano*, 11: 361-389 pp.

Pardos. M., Del Castillo. J.R., Caellas. I., Montero. G. (2005). Ecophysiology of natural regeneration of forest stands in Spain. *Investigacion Agraria: Recursos y Sistemas Forestales* 14: 434-445 pp.

Paiero. P. (1971). Sul deperimento della pineta litoranea di Cecina. *L'Italia Forestale e Montana*, 26(5):196-207 pp.

Pasini. L., Bruschini. S., Bertoli. A., Mazza. R., Fracheboud. Y. and Marocco. A. (2005). Photosynthetic performance of cold-sensitive mutants of maize at low temperature. *Physiologia Plantarum*, 124: 362-370 pp.

Pardos. M., Climent. J., Gil. L., Pardos. J.A. (2003). Shoot growth components and flowering phenology in grafted *Pinus halepensis* Mill. *Trees-Structure and Function*, vol. 17, n° 5, 442- 450 pp.

Pavari. A. (1931). Sulla vegetazione del pino marittimo e del pino domestico nei terreni calcarei. *L'Alpe*, 18: 541-550 pp.

Pavari. A. (1954). Pino domestico. *Monti e Boschi*, 5(11-12):543-547 pp.

Pavari. A. (1955). Sul trattamento delle fustaie di pino domestico (*Pinus pinea* L.). Atti del Congresso Nazionale di Selvicoltura. Firenze, 14-18 marzo 1954. Volume I: Relazioni, pp. 69-97. Tipografia Coppini & C., Firenze.

Passioura. J. (2004). Increasing crop productivity when water is scarce: from breeding to field management. *In proceedings of the 4th International Crop Science Congress "New directions for a diverse planet" Brisbane, Australia.* 12p.

Papaioannou. I. (1935). *Pinus halepensis* Mill., *Pinus pithyusa* Ster. and *Pinus brutia* in Greece. Dasiki Zoi, Athens.

Papamichos. N et Alii. (1986). Ecological study and use of natural resources of the Strofilia Forest. N W. Peloponnesos. Dept of Forestry and Nat. Enviro. Univ. Thessaliniki. Dept. Biology Univ. of Patras.

Pärtel. M., Zobel. M., Liira. J., Zobel. K. (2000). Species richness limitations in productive and oligotrophic plant communities. *Oikos* 90: 191-193pp.

Pdau. (2010). La révision du Plan Directeur d'Aménagement et d'Urbanisme intercommunal de : (Constantine, El Khroub, Hamma Bouziane, Didouche Mourad, Ain Smara, Ben Badis), 21-22 pp.

Pdau. (2006). La révision du Plan Directeur d'Aménagement et d'Urbanisme de la Commune de Zighoud Youcef, 19-30 pp.

Peters. S., Boutin. S., MacDonald. E. (2003). Predisersal seed predation of white spruce cones in logged boreal mixedwood forest. *Canadian Journal of Forest* 33: 33-40 pp.

Perrin. H. (1954). Sylviculture. Tome II. Traduzione italiana annotata a cura di BERNETTI G. Accademia Italiana di Scienze Forestali, Firenze. 1986.

Philipson. J.J. (1997). Predicting cone crop potential in conifers by assessment of developing cone buds and cones. *Forestry* 70: 87-90 pp.

Poupon, H. (1980).- Etude de la phénologie de la strate ligneuse à Fété-Olé (Sénégal septentrional) de 1971 à 1977. *Bulletin IFAN -DAKAR*, Tome 41, série A, n °1.

Poupon. H. (1970). Sur la croissance de quelques espèces de pins dans ses rapports avec le climat du nord de la Tunisie. Thèse 3ème Cycle. Faculté des Sciences Orsay. 129p.

Poupon. H. (1970). Etude de la croissance en hauteur, et en circonférence de quelques espèces de pin et d'eucalyptus dans l'arboretum de Zernia. *Annales de l'institut national de recherche forestières de Tunisie. I.N.R.F.T. - ARIANA - (Tunisie) Vol. 4 - Fasc. 5 1970.* 5-28pp.

Pozzera. G. (1959). Rapporti fra produzione di strobili in *Pinus pinea* L. ed andamento stagionale. *L'Italia Forestale e Montana* 14:196-206 pp.

Primault. B et al. (1971). Atlas phénologique. *Institut Suisse de Météorologie*. p 76.

Primault. B. (1990). Détermination du début de la période de végétation par l'évolution de la température comparée à deux phases phénologiques. *Publications de l'Institut Suisse de Météorologie*, 48, 381-384.

Profili. V. (1993). Analisi morfologiche degli apparati radicali di pino domestico (*Pinus pinea* L.) nella pineta di Alberese. Tesi di Laurea. Istituto di Selvicoltura. Università degli Studi di Firenze.

Q

Quézel. P. (1979). La région méditerranéenne française et ses essences forestières. Signification écologique dans le contexte circum-méditerranéen. *Forêt méditerranéenne*, 1: 7-18pp.

Quézel. P. (1980). Biogéographie et écologie des Conifères méditerranéens, 201-255 pp, in: Pesson P. (ed), *Documents d'Ecologie Forestière*. Paris.

R

Ramade. (1984). *Eléments d'écologie (Ecologie fondamentale)*. Ed Mc-Graw-Hill. Paris. 397p.

Ramalanjoana. M. (2013). Etude de la régénération de la senescence de *Tamarindus indica* et ses impacts et implications ecologiques dans la réserve de Bezà Mahafaly. Mémoire d'ingénieur en sciences agronomiques. Université d'Antananarovi, 33-46 pp.

Rapp. M., Ibrahim M. (1978). Egouttement, écoulement et interception des précipitations par un peuplement de *Pinus pinea* L. *Oecologia Plantarum*, 13(4), 321-330 pp.

Rapp. M. (1984). The monthly cycling of nutrients in a stand of *Pinus pinea* L. State and Change of For. Ecosys. Indicators in Current Researches. Swed. Univ. Agric. Sci. Dept. Ecol. Envir. Res. Rept., Agren G. I. Ed. 13:261-291pp.

Rego. F.C. (2006). Les causes du dépérissement des chênes lièges et chênes verts Séminaire « Vitalité des peuplements de chênes lièges et de chênes verts ». *Nouvelles des forêts méditerranéennes*, 4: 1-12 pp.

Rikli. M. (1943). *Das Pflanzenkleid der Mittelmeerlander*. I Bond. Huber Vlg., Bern.

Root. T. L., Price. J. T., Hall. K. R., Schneider. S. H., Rosenzweig. C., and Pounds. J. A. (2003). Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature* 421:57-60 pp.

Robisoa. M., Rajoelison. G., Rabenilalana. M. et Rakoto. H. (2008). Définition d'un état zéro et mise en place d'un système de suivi écologique permanent de l'Arboretum de la station forestière de Mandraka. Centre for development and environment (cde). ESAPP-Eastern and Southern Africa Partnership Program, 82p.

Rothe. P. L. (1964). Régénération naturelle en forêt tropicale : le *Dypterocarpus dyeri* (Dau) sur le versant Cambodgien du golfe du Siam, Bois et forêt des tropiques. 386 – 397pp.

Rollet. B. (1969). La régénération naturelle en forêt dense sempervirente de plaine de la Guyane Vénézuélienne. Bois et forêts de Tropiques, 124 : 19-38 pp.

Rubner. K. (1960). Die pflanzengeographischen-ökologischen Grundlagen des Waldbaues : Phänologie des Waldes, 129-140 pp.

Ruellan A. (1999). The main rules of soil distribution in the mediterranean world. In: Bech. J. Extended Abstracts volume. 31-32 pp.

S

Sarvas. R. (1962). Investigations on the flowering and seed crop of *Pinus silvestris*. Commun. Institute of For Fenn 53:198 p.

Sauer. R. H. (1975). The rcial jonship of cumulative sum and moving averages of temperature ta reproductive phenology in *Clarkia*. *Am. Midi. Nal.*, 95: 144-158 pp.

Sbay. H. (2000). Nouveau test de provenance de *Pinus pinea* au Maroc. Actas (II) del Primer. Simposio del Pino Pinonero (*Pinus pinea* L.) fobrero 2000. Valladolid 22-24 de febrero 2000. 167-172 pp.

Sbay. (2007). Amélioration de *Pinus Pinea* au Maroc.

Sbay. H. (1995). Situation du Pin pignon (*Pinus pinea* L.) au Maroc. Bilan des travaux de recherches. CNRF. B. P. Rabat, 763 p.

Schwartz. M. D., and Reiter. B. E. (2000). Changes in North American spring. *International Journal of Climatology* 20:929-932.

Sebei. H., Albouchi. A., Rapp. M., El Aouni. M.H. (2001). Evaluation de la biomasse arborée et arbustive dans une séquence de dégradation de la subéraie à Cytise de Kroumirie (Tunisie). *Annals of Forest Sciences* 58 : 175-191.

Seigue. A. (1985). La forêt circumméditerranéenne et ses problèmes. Ed. Maisonneuve et Larose, Paris.

Seltzer. P. (1946). Le climat de l'Algérie. Inst.Météor.et de Phys. Du Globe. Alger. 219p.

Shaiek. O. (2005). Etude des caractéristiques dendrométriques du pin maritime dans la forêt de Rimel (Région de Bizerte). Diplôme de Master. Faculté des Sciences de Bizerte. 69p.

Sherafaw. B., Baker. DA. (1996). An evaluation of drought screening technics for *Eragrotis tef*. *Crop science* 36:74-85.

Sibthorp. J., Smith. J. E. (1813). Florae Graecae Prodromus, Vol., 2:247.

Sirois. L. (2000). Spatiotemporal variation in black spruce cone and seed crops along a boreal forest-tree line transect. *Canadian Journal of Forest Research* 30: 900.

Souren. J.E., Wiegant. F.A., Van wijk. R. (1999). The role of hsp70 in protection and repair of luciferase activity in vivo; experimental data and mathematical modelling. *Cell Mol. Life Sci.*, 55: 799-811pp.

Souguir. D. (2009). Modifications métaboliques, moléculaires et génotoxicité induites par le cadmium chez *Vicia faba*, 78p.

Specht. R. L. et Yates. D. J. (1990). Climatic control of structure and phenology of foliage shoots in dicotyledonous overstorey and understory strata of subtropical plant communities in southeast Queensland. *Acta Oecologia*, 11(2): 215-233.

Sparks. T. H. and Menzel. A. (2002). Observed changes in seasons: an overview. *International Journal of Climatology* 22:1715-1725 pp.

SSDS. (Soil Survey Division Staff). (1993). Soil Survey Manual. USDA Handbk, n° 18 (Department of Agriculture). Printing Office, Washington (USA), 437 p.

Sung. D.Y., Kaplan. F., Lee K.J. and Guy. C.L. (2003). Acquired tolerance to temperature extremes. *Trends in Plant Science*, 8: 179-187.

T

Talame. V., Ozturk. N., Bohnert. H. and Tuberosa. R. (2007). Barley transcript profiles under dehydration shock and drought stress treatments: a comparative analysis. *Journal of Experimental Botany*, 58(2): 229-240 pp.

Tahri. E. H., Belabed. A et Sadki. K. (1998). Effet d'un stress osmotique sur l'accumulation de proline, de chlorophylle et des ARNm codant pour la glutamine synthétase chez trois variétés de blé dur (*Triticum durum*). *Bull. Inst. Sci.*, Rabat, n° 21 (1997-1998). 81-87 pp.

Tardieu. F. (2005). Plant tolerance to water deficit: Physical limits and possibilities for progress. *Geo Sci.*, 337: 57-67 pp.

Tomescu. A. (1957). Fazele periodice de vegetatie in anul 1954. *Ann. hist. Cercetari Silvice*, 18, 47-76 pp.

Trinchant. JC., Boscari. A., Spennato. G., Van de Sype. G., Le Rudulier. D. (2004). Proline Betaine Accumulation and Metabolism in Alfalfa Plants under NaCl Stress. *Exploring Its Compartmentalization in Nodules Plant Physiology*, Vol. 135: 1583-94 pp.

Troll. W., Lindsley. J. (1955). A photometric method for the determination of proline. *J.Boil.Chem.*215, 655-660 pp.

Tucker. C. J., Slayback. D. A., Pinzon. J. E., Los. S. O., R. B. Myneni, and Taylor. M. G. (2001). Higher northern latitude normalized difference vegetation index and growing season trends from 1982 to 1999. *International Journal of Biometeorology* 45:184-190.

Turnbull. L.A., Crawley. M.J., Rees. M.(2000). Are plant populations seed-limited a review of seed sowing experiments. *Oikos* 88: 225-238 pp.

U

Ulrich. E. (1997). Renecofor. Manuel de référence n° 12 pour les observations phénologiques. Première version Mars 1997, ONF-Fontainebleau, 20 p.

V

Vabre-Durrieu. (1956). Le froid et les graines de quelques Abiétacées. *Trav. Lab. For. Toulouse*, 5(1). Art. 29, 6p.

Vacas De Carvalho. M. A. (1989). Algumas considerações sobre o pinheiro manso, na região de Alcacer do Sal. *Reunion sobre Selvicultura, Mejora y Produccion de Pinus pinea*, Madrid, 11-12 Diciembre.

Vacas De Carvalho. M. A., Pinto Berkemeier. M. R. (1991). 1ª análise da rentabilidade do pinheiro manso como produtor de fruto. *Direção General das Forestas. Informação*, 2 (7).

Van Wesemael. B. (2006). Application de la décision 1/19 de la première réunion de la conférence des parties sur les directives techniques pour la gestion écologiquement rationnelle des déchets dangereux visés par la convention de Bâle. *Rapport de secrétariat*, 215p.

Vennetier. M., Girard. F., Ouarmim. S., Thabeet A., Ripert. C., Cailleret. M., Caraglio. Y. (2010b). Climate change impact on tree architecture may contribute to forest decline and dieback. In: *XXIII IUFRO world congress*, (eds Parrotta J.A. ; Carr M.A.), Commonwealth Forestry Association, Seoul, Korea, 23-28 August 2010, 45 p.

Vennetier. M., Ripert. C. (2010c). Flore méditerranéenne et changement climatique: la course poursuite est engagée. *Forêt méditerranéenne*, vol. XXXI, n° 1, 15-24 pp.

Vennetier. M., Girard. F., Didier. C., Ouamim. S., Ripert. C (2011). Adaptation phénologique du pin d'Alep au changement climatique. *Forêt méditerranéenne*, 32 (2), 151-167 pp.

Veechi. A. (1980). Les cultures des bois comestibles, les fruits du bouïd. 147p.

Verslues. P., Agarwal. M., Katiyar-Agarwal. S., Zhu. J. (2006). Methods and concepts in quantifying resistance to drought, salt and freezing, abiotic stresses that affect plant water status. *The Plant Journal*, 45: 523-539.

Vidakovic. M. (1991). Conifers morphology and variation. Translated by Maja Soljan. *Graficki Zavod Hrvatske*.

W

Wahid. A., Perveen. M., Gelani. S., Basra. SMA. (2007). Pretreatment of seed with H₂O₂ improves salt tolerance of wheat seedlings by alleviation of oxidative damage and expression of stress proteins. *J. Plant Physiol.* 164: 283-294 pp.

Walter. H. (1968). Die Vegetation der Erde in ökophysiologischer Betrachtung. 1001 p.

Walther. G. R. (2004). Plants in a warmer world. Perspectives in Plant Ecology Evolution and Systematics 6:169-185 pp.

Wang. W.X., Vinocur. B., Shaseyov. O. and Altman. A. (2001). Biotechnology of plant osmotic stress tolerance: physiological and molecular considerations. *Acta Hort.*, 560: 285-292 pp.

Wang. W. X., Vinocur. B. and Altman. A. (2003). Plant responses to drought, salinity and extreme temperatures: towards genetic engineering for stress tolerance. *Planta*, 218: 1-14pp.

Witcombe. JR., PA. Hollington. CJ. Howarth. S. Reader. KA. Steel. (2009). Breeding for abiotic stresses for sustainable agriculture. *Phil. Trans. R. Soc. B.*, 363: 703-716 pp.

Williams. L. E. (1996). Grape. *In: E. a. S. Zamski, A (ed.) Photoassimilate Distribution in lants and Crops.* Marcel Dekker, Inc., New York.

William. A., Pryor. J., Stanley. P. (1975). Suggested mechanism for the production of malonaldehyde during the autoxidation of polyunsaturated fatty acids. *Nonenzymic production of prostaglandin endoperoxides during autoxidation. Journal of Organic Chemistry*, vol. 40 (24), 3615-3617 pp.

Z

Zapata. C. (1998). Suivi pluriannuel de la mise en place et de la mobilisation des r.serves carbon.es et azot. chez 2 c.pages de vigne pr.senant une sensibilit. . La coulure. Institut National Agronomique Paris-Grignon. 69-77 pp.

Zech. W., Çepel N. (1973). Acacia cyanophylla als Hilfpflanze fur Kiofernaufforstungen im mediterranen Kustengebiet Anatolien. *Forest. Centralblatt*, 92(3): 111-119 pp.

Zhang. S.Y., Chauret. G. (2001). Impact of initial spacing on tree and wood characteristics, product quality and value recovery in black spruce (*Picea mariana*). Canadian Forest Service Report. Vol 35. Forintek Canada Corp. 47pp.

Zhou. L. M., Tucker. C. J., Kaufmann. R. K., Slayback. D., Shabanov. N. V., and Myneni. R. B. (2001). Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres.* 106:20069-20083.

Résumé

Le Pin pignon (*Pinus pinea L.*) est une essence forestière à valoriser sur le plan économique par sa production de bois et de pignes. En Algérie, il occupe une superficie totale de 3506 ha, la plus grande surface se trouve dans le massif de Djebel Ouahch 2278 ha.

Ce travail vise essentiellement à statuer sur le développement et l'adaptation de cette essence dans la zone de Djebel Ouahch pour d'éventuels reboisements sous forme de peuplements équiennes avec un âge moyen de 40 ans. La production fructifère moyenne est évaluée entre 3,80 et 523,76 tonnes de pignes en coque; Dans des bonnes conditions, la quantité de cônes récoltés est de 554,110 cône/ha dans la zone étudié.

La caractérisation physico-chimique de sol dans la zone d'étude révèle une texture équilibrée, avec un faible taux en argile (environ 27 %), un pH moyen compris entre 6 et 7.5 et un taux de calcaire total très faible.

Sur le plan morphologique, la capacité germinative des graines est de bonne qualité avec une croissance racinaire et aérienne assez soutenue. Ces paramètres morphologiques ont montré une différence statistiquement significative entre les différents traitements et saisons. Les semis élevé en condition semis contrôlées subissent des stress de courte durée (03 heures) à une gamme de température variant entre -10 °C et 50°C au cours desquelles sont quantifiés les marqueurs biochimiques (chlorophylle, proline, sucres solubles, protéines et des enzymes). Ces résultats qui montrent sous une contrainte thermique, une augmentation des pigments chlorophylliens à 38°C. Les semis présentent une adaptation à températures inférieures à 44°C pour la proline, les sucres solubles, la catalase et MDA. L'intensité de stress hydrique et thermique est significative pour toutes les variables analysées. Les semis de Pin pignon sont aptes à accumuler les différents osmolytes dans les différents organes en réponse au stress combiné. L'accumulation des sucres solubles est bien marquée pour le témoin et à 38°C; alors que l'augmentation de la proline est significative dans les racines à la contrainte thermique à 38°C au niveau N1 et 44°C au niveau N2 (55%). Les semis manifeste effectivement des traits d'adaptation biochimique en réponse aux fluctuations combinées, hydriques et thermiques.

L'analyse de la phénologie a été observée sur des branches d'une croissance comprise entre 15-20 ans dans la région de Provence-Alpes-Côte d'Azur, et dans la région de Djebel Ouahch. L'exclusion de pluie a diminué le nombre annuel de cycles de croissance des pousses et leur durée et aussi la vitesse de croissance des aiguilles.

La qualité des peuplements de Pin pignon est moyennement stable, un taux de régénération faible, et le taux de mortalité assez fort due à l'action anthropique et aux incendie.

Mots clés: Pin pignon (*Pinus pinea L.*), Djebel Ouahch, croissance, phénologie, stress thermique, stress hydrique, marqueurs biochimiques .

Summary

The Stone pine (*Pinus pinea* L.) is a forest tree species to be valorized on the economic level by its production of wood and pine nuts. In Algeria, it occupies a total surface of 3506 ha; the largest surface is located on the massif of Djebel Ouahch 2278 ha.

The present work aimed mainly at determining on the development and adaptation of this forest species in the zone of Djebel Ouahch for possible reforestations in form of equilateral plantings with a medium age of 40 years. Medium fruit-bearing production is assessed between 3,80 and 523,76 tons of pine nuts in shells. In good conditions, the quantity of harvested is 554,110 cone / hectare in the studied zone.

The physicochemical characterization of the study zone reveals a balanced texture, with a low percentage in loam (~ 27 %), a medium pH ranged between 6 - 7.5 and a very low total quantity of limestone.

On morphological level, the germinal capacity of seeds is of good quality with a below and above-ground live biomass fairly sustained. These morphological parameters showed a statistically significant difference among different treatments and seasons.

The seedlings grown in semi controlled conditions suffer from short-term stresses (03 hrs) in a range of temperature varying between -10 °C and 50°C while the biochemical markers (chlorophyll, proline, soluble sugars, proteins and enzymes) are quantified.

Under a thermal pressure, the results show an increase of the chlorophyll pigments at 38°C. The seedlings show an adaptation to lower temperatures at 44°C for the proline, the soluble sugars, the catalase and MDA. The intensity of hydric and thermal stress is significant for all analyzed parameters.

The Pine Seedlings are capable to accumulate the different osmolytes in the different organs in response to combined stress. The accumulation of soluble sugars is highly marked for the control at 38°C; while the increase of the proline is very significant in roots under thermal pressure at 38°C at level N1 and at 44°C at level N2 (55 %). The Seedlings show clear features of biochemical adaptation in response to combined, hydric and thermal, fluctuations.

The phenology analysis was observed on branches of a growth ranging between 15-20 years in the region of Provence-Alpes-Côte d'Azur and in the region of Djebel Ouahch. The exclusion of rainfall diminished the annual number of growth cycles of shoots and their duration and also the speed of needles growth.

The quality of the populations of Stone pine is moderately stable with a weak rate of regeneration and a quite high mortality rate due to anthropic action and fires.

Key words: Stone pine (*Pinus pinea*), Djebel Ouahch, growth, phenology, thermal stress, hydric stress, biochemical markers.

ملخص

الصنوبر الثمري هو نوع من الأنواع الغابية التي يتم تثمينها اقتصاديا من حيث إنتاجه للخشب و الثمار. في الجزائر يحتل الصنوبر الثمري مساحة إجمالية تقدر ب 3506 هكتار, و أكبر مساحة متواجدة في منطقة جبل الوحش تقدر ب 2278 هكتار.

و يهدف هذا العمل أساسا إلى اتخاذ قرار بشأن تطوير هذا النوع و تكيفه في منطقة جبل الوحش من أجل إعادة التشجير بشكل منصات عمرية تبلغ أعمارها 40 سنة. و يقدر متوسط إنتاج البذور بين 3,80 و 523,76 طن.

في ظل ظروف جيدة, عدد الثمار التي تم حصادها قدرت ب 554 ثمرة/هكتار في المنطقة المدروسة. إن توصيف الخصائص الكيميائية الفيزيائية للتربة في المنطقة المدروسة تكشف بنية متوازنة مع معدل منخفض للطين (حوالي 27%), متوسط درجة الحموضة تتراوح بين 6 و 7,5 و نسبة جد منخفضة للكلس.

من الناحية المورفولوجية, فإن البذور ذات قدرة إنباتية جيدة, مع نمو قوي نسبيا للسيقان و الجذور. هذه العوامل المورفولوجية تبيّن فرقا إحصائيا معنويا بين مختلف المعالجات و الفصول.

إن الشتلات المنبّتة في ظروف شبه مراقبة تتعرض لإجهادات حرارية قصيرة المدى (3 ساعات), تتراوح ما بين 10- درجة مئوية إلى 50 درجة مئوية ويتم خلالها قياس العوامل البيوكيميائية (الكلوروفيل, البرولين, السكريات, البروتينات و الإنزيمات).

هذه النتائج التي تظهر تحت تأثير الإجهاد الحراري ارتفاعا في أصباغ الكلوروفيل عند درجة حرارة 38 درجة مئوية. إن الشتلات تظهر تكيفا في درجات الحرارة أقل من 44 درجة مئوية بالنسبة للبرولين والسكريات و الكاتالاز و MDA. إن شدة الإجهاد المائي و الإجهاد الحراري كبيرة بالنسبة لجميع المتغيرات التي تم تحليلها. شتلات الصنوبر الثمري قادرة على تجميع مختلف الأوسموليتس osmolytes في مختلف الأجهزة ردا على التوتر المجتمع (المائي و الحراري). إن السكريات القابلة للذوبان ملحوظة بشكل جيد في الشاهد témoin و درجة حرارة 38 درجة مئوية, في حين أن زيادة البرولين كبيرة في الجذور تحت تأثير الإجهاد الحراري عند درجة الحرارة 38 درجة مئوية في المستوى N1 وعند درجة الحرارة 44 درجة مئوية في المستوى N2 (55%).

تظهر الشتلات في الواقع سمات التكيف البيوكيميائية ردا على التقلبات المشتركة المائية والحرارية. لقد لوحظ التحليل الفينولوجي على الفروع ذات النمو بين 15 و 20 سنة, في منطقة Provence-Alpes-Côte d'Azur و منطقة جبل الوحش.

أدى نقصان كمية الأمطار إلى انخفاض عدد دورات النمو السنوية ومدتها للأغصان, وكذلك إلى نقصان معدل نمو الإبر.

إن نوعية الصنوبر الثمري مستقرة إلى حد ما, بحيث أن معدل التجدد منخفض ومعدل الوفيات مرتفع نسبيا بسبب النشاط الإنساني والحرائق.

الكلمات المفتاحية : الصنوبر الثمري, جبل الوحش, نمو, فينولوجي, الإجهاد الحراري, الإجهاد المائي, العوامل البيوكيميائية.

ANNEXE 1 : Matériels des mesures dendrométriques

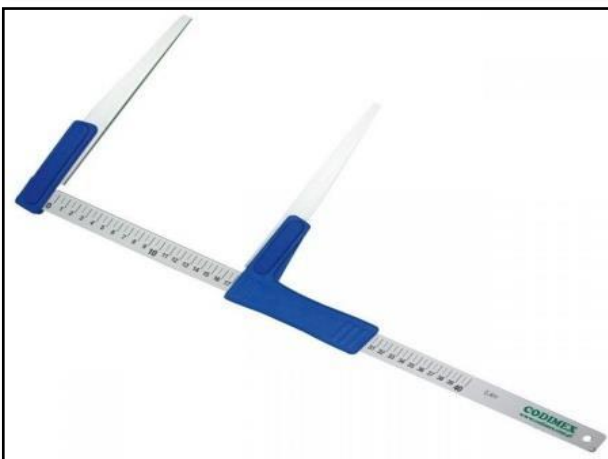
GPS GARMIN ORIGON 550



Cordage pour délimiter un carré d'échantillonnage de 400m²



Compas forestier



ANNEXE 2 : Modèle d'étiquette d'échantillonnage du sol

Parcelle :

Date :

Profondeur :

Remarque :

Opérateur :

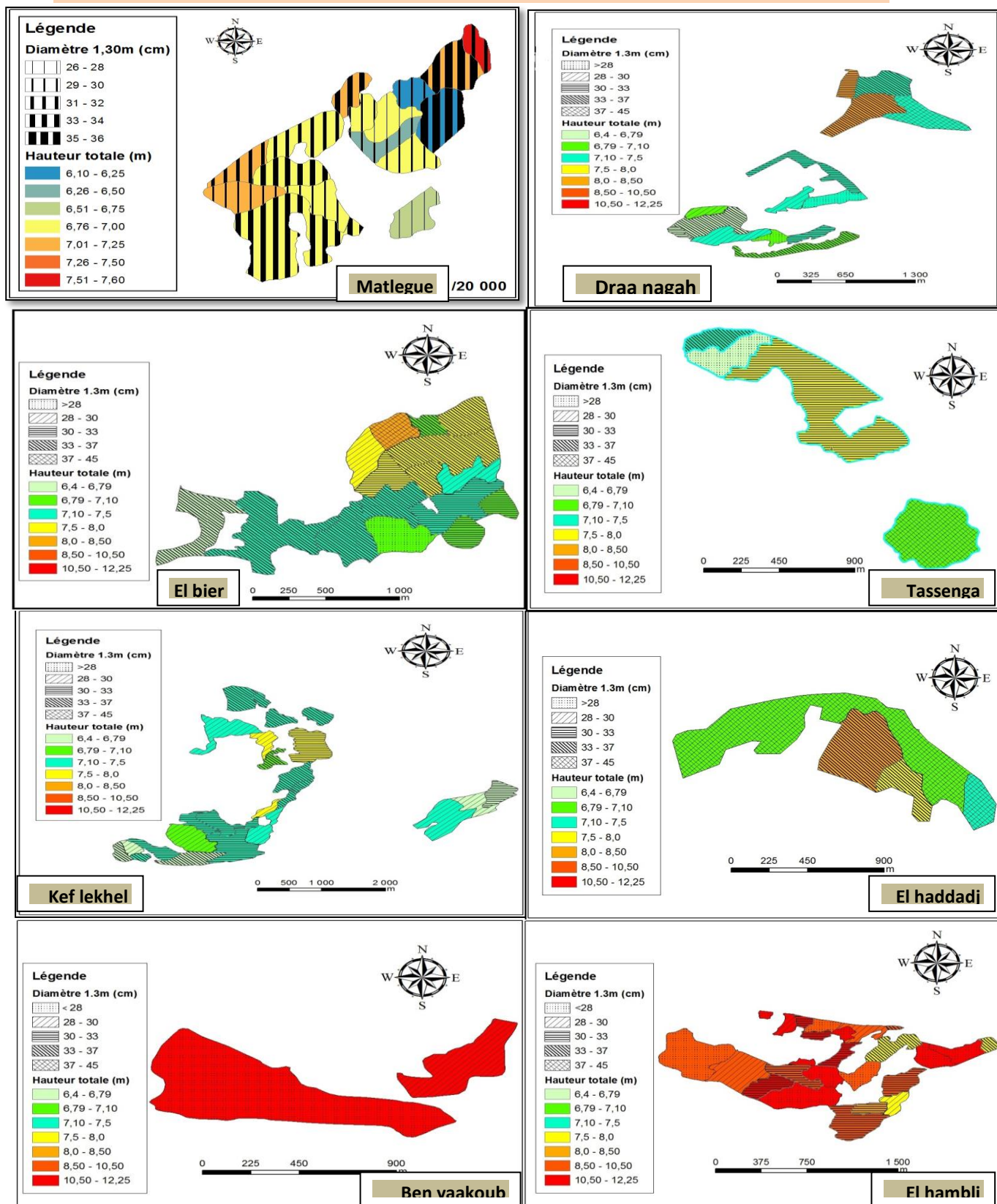
N° :

.....

..

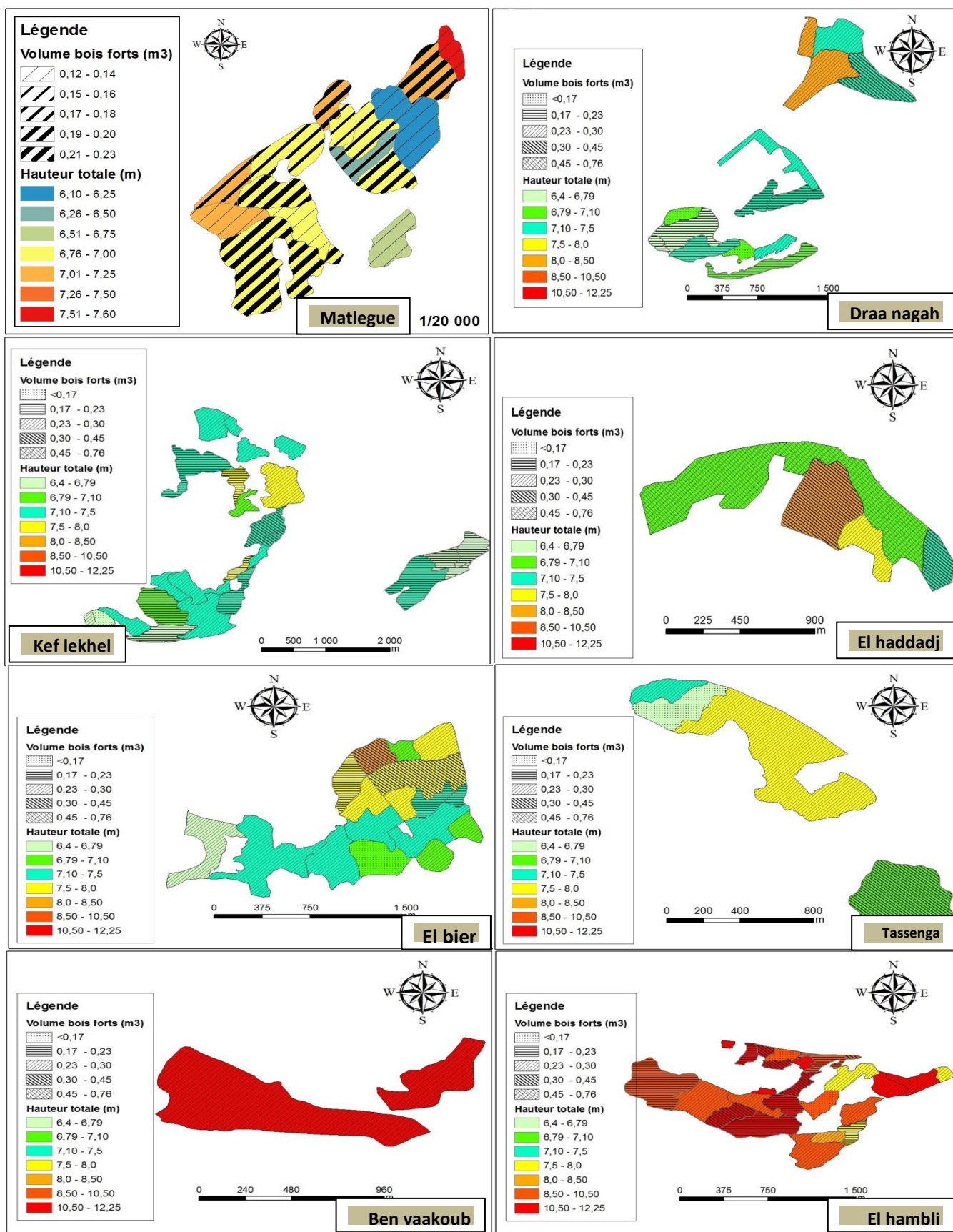
ANNEXE 3 : Corrélation entre les différents paramètres dendrométriques

1. Hauteur totale (m) et Diamètre 1.30 (cm)



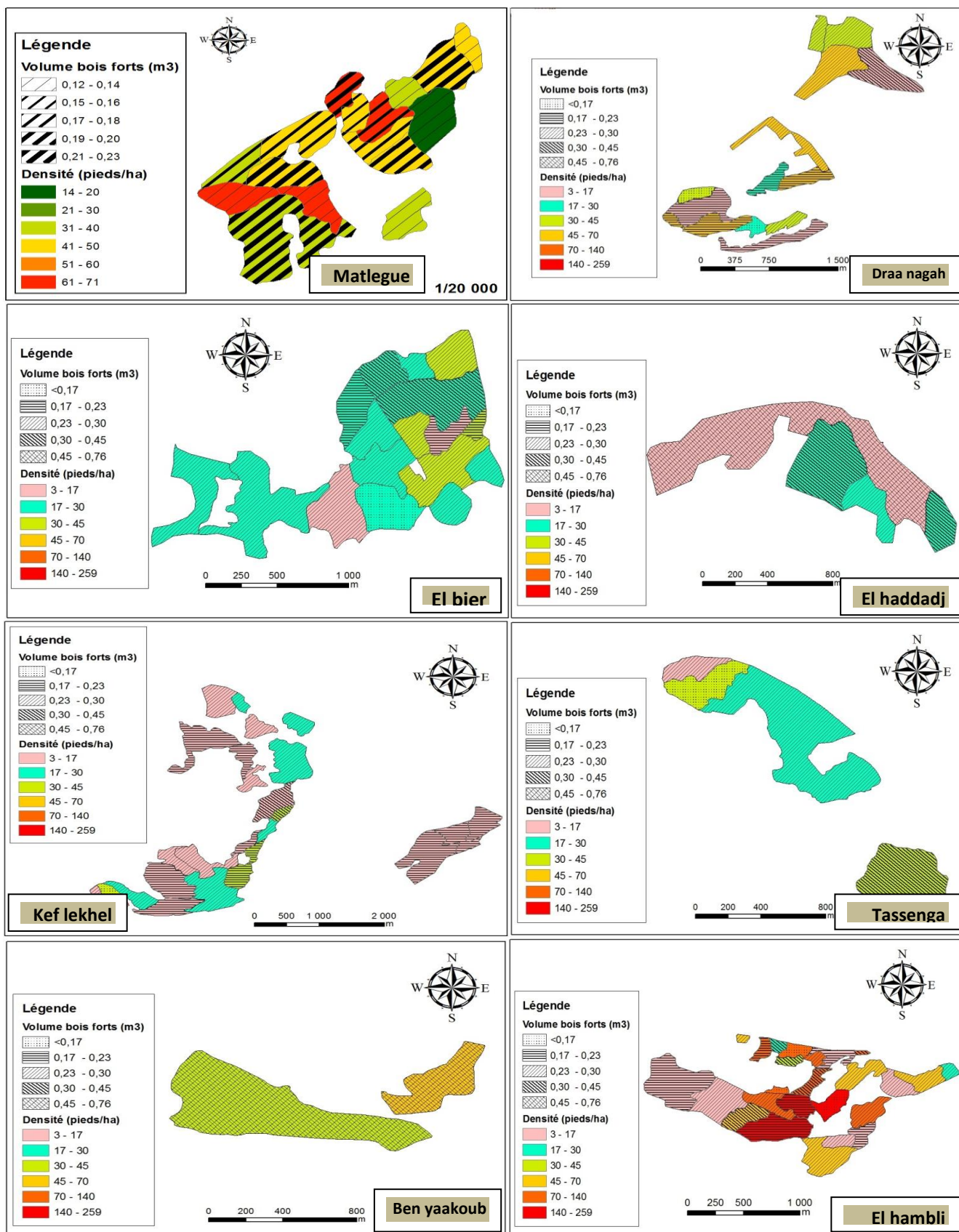
Carte 1. Relation entre la hauteur totale et le diamètre à 1,30m dans les stations étudiées

2. Hauteur totale (m) et Volume bois forts



Carte. Relation entre la hauteur totale et le volume bois forts dans les stations étudiées

3. Volume bois forts et Densité



Carte. Relation entre le volume bois forts et la densité des arbres dans les stations étudiés

ANNEXE 4 : Relation entre les paramètres physico-chimiques des sols étudiés

Tableau 1. Matrice de corrélations entre les paramètres physicochimiques

Variables	pH eau	pH kcl	CE	CaCO3	CEC	d(a)	P	C	MO	N	C/N	A	SG	SF	LG	LF
pH eau	1	0,261	0,281	0,390	-0,466	0,252	-0,251	-0,052	-0,052	0,020	0,015	0,041	-0,549	0,203	-0,230	0,248
pH kcl	0,261	1	0,558	0,818	-0,748	0,053	-0,053	-0,033	-0,033	0,766	-0,283	0,327	-0,035	0,457	-0,565	-0,295
CE	0,281	0,558	1	0,283	-0,669	-0,087	0,088	0,630	0,630	0,600	0,335	-0,086	-0,314	0,380	-0,379	0,158
CaCO3	0,390	0,818	0,283	1	-0,636	0,006	-0,007	-0,331	-0,331	0,516	-0,440	0,576	-0,117	0,223	-0,467	-0,404
CEC	-0,466	-0,748	-0,669	-0,636	1	-0,463	0,462	-0,122	-0,122	-0,539	0,058	-0,264	0,227	-0,386	0,494	0,228
d(a)	0,252	0,053	-0,087	0,006	-0,463	1	-1,000	-0,233	-0,233	-0,054	-0,157	0,314	0,149	-0,072	-0,028	-0,254
P	-0,251	-0,053	0,088	-0,007	0,462	-1,000	1	0,232	0,232	0,047	0,158	-0,317	-0,155	0,076	0,026	0,256
C	-0,052	-0,033	0,630	-0,331	-0,122	-0,233	0,232	1	1,000	0,294	0,887	-0,636	-0,090	-0,008	0,211	0,652
MO	-0,052	-0,033	0,630	-0,331	-0,122	-0,233	0,232	1,000	1	0,294	0,887	-0,636	-0,090	-0,008	0,211	0,652
N	0,020	0,766	0,600	0,516	-0,539	-0,054	0,047	0,294	0,294	1	-0,081	0,186	0,339	0,169	-0,329	-0,185
C/N	0,015	-0,283	0,335	-0,440	0,058	-0,157	0,158	0,887	0,887	-0,081	1	-0,708	-0,237	-0,154	0,430	0,810
A	0,041	0,327	-0,086	0,576	-0,264	0,314	-0,317	-0,636	-0,636	0,186	-0,708	1	0,320	-0,121	-0,227	-0,769
SG	-0,549	-0,035	-0,314	-0,117	0,227	0,149	-0,155	-0,090	-0,090	0,339	-0,237	0,320	1	-0,298	0,151	-0,414
SF	0,203	0,457	0,380	0,223	-0,386	-0,072	0,076	-0,008	-0,008	0,169	-0,154	-0,121	-0,298	1	-0,888	-0,281
LG	-0,230	-0,565	-0,379	-0,467	0,494	-0,028	0,026	0,211	0,211	-0,329	0,430	-0,227	0,151	-0,888	1	0,558
LF	0,248	-0,295	0,158	-0,404	0,228	-0,254	0,256	0,652	0,652	-0,185	0,810	-0,769	-0,414	-0,281	0,558	1

ANNEXE 5 : Teneur en eau et germination

Tableau 1. Teneur en eau moyenne des graines (N=20) de pin pignon

Nombre de graines	Poids frais (g)	Poids sec(g)	Taux d'humidité(%)
1	1,027	0,925	11,0270
2	1,019	0,914	11,4879
3	1,026	0,924	11,0389
4	1,068	0,961	11,1342
5	0,914	0,816	12,0098
6	0,912	0,820	11,2195
7	0,919	0,824	11,5213
8	1,021	0,917	11,3413
9	1,063	0,951	11,7770
10	1,171	1,054	11,1005
11	0,929	0,836	11,1244
12	1,047	0,951	10,0946
13	1,113	1,010	10,1980
14	0,914	0,840	8,8095
15	0,990	0,888	11,4864
16	0,992	0,893	11,0862
17	1,039	0,935	11,1229
18	0,834	0,766	8,8772
19	1,016	0,914	11,1597
20	1,005	0,904	11,1725
Moyenne	1,00095	0,90215	10,9398

Tableau 2. Teneur en eau moyenne de coque et d'amende des graines de pin pignon

Nombre de graines	Poids de coque seul (g)			Poids d'amende seul (g)		
	Frais	Sec	T. humidité	Frais	Sec	T. humidité
1	0,811	0,719	12,7955	0,191	0,163	17,1779
2	0,852	0,754	12,9973	0,212	0,173	22,5434
3	0,895	0,781	14,5966	0,189	0,163	15,9509
4	0,806	0,718	12,2563	0,185	0,169	9,4675
5	0,765	0,674	13,5015	0,190	0,165	15,1515
6	0,817	0,723	13,0014	0,181	0,162	11,7284
7	0,913	0,809	12,8554	0,188	0,175	7,4286
8	0,740	0,654	13,1498	0,180	0,150	20,000
9	0,755	0,670	12,6866	0,183	0,172	6,3953
10	0,810	0,720	12,5	0,174	0,162	7,4074
11	0,793	0,704	12,6420	0,194	0,161	20,4969
12	0,715	0,633	12,9542	0,166	0,155	7,0968
13	0,820	0,734	11,7166	0,198	0,168	17,8571
14	0,795	0,712	11,6573	0,222	0,189	17,4603
15	0,877	0,782	12,1483	0,158	0,178	17,7215
16	0,655	0,583	12,3499	0,200	0,154	29,8701
17	0,833	0,733	13,6426	0,211	0,185	14,0541
18	0,793	0,704	12,6420	0,179	0,164	9,1463
19	0,831	0,742	11,9946	0,175	0,164	6,7073
20	0,913	0,826	10,5327	0,195	0,173	12,7167
Moyenne	0,8095	0,7188	12,6310	0,1900	0,1663	14,3189

Tableau 3. Teneur en eau moyenne de Tégument et d'amende+Tégument des graines de pin pignon

Nombre de graines	Poids de Tégument seul (g)			Poids d'amende + Tégument (g)		
	Frais	Sec	T. humidité	Frais	Sec	T. humidité
1	0,0092	0,009	2,2222	0,194	0,172	12,7907
2	0,0080	0,0075	6,6666	0,250	0,234	6,8376
3	0,0051	0,0048	6,2500	0,195	0,181	7,7348
4	0,0052	0,0049	6,1224	0,212	0,199	6,5327
5	0,0060	0,0057	5,2632	0,186	0,175	6,2857
6	0,0059	0,0055	7,2727	0,235	0,219	7,3059
7	0,0057	0,0054	5,5556	0,202	0,189	6,8783
8	0,0061	0,0058	5,1724	0,233	0,216	7,8704
9	0,0080	0,0077	3,8961	0,211	0,197	7,1066
10	0,0056	0,0052	7,6923	0,202	0,188	7,4468
11	0,0063	0,006	5,000	0,187	0,176	6,2500
12	0,0055	0,0051	7,8431	0,181	0,169	7,1006
13	0,0051	0,0048	6,2500	0,242	0,227	6,6079
14	0,0057	0,0055	3,6364	0,188	0,177	6,2147
15	0,0060	0,0057	5,2632	0,221	0,207	6,7633
16	0,0066	0,0061	8,1967	0,166	0,156	6,4103
17	0,0053	0,0050	6,000	0,212	0,196	8,1633
18	0,0049	0,0046	6,5217	0,185	0,174	6,3218
19	0,0050	0,0046	8,6957	0,193	0,181	6,6298
20	0,0057	0,0054	5,5555	0,211	0,199	6,0302
Moyenne	0,0060	0,0057	5,9538	0,2053	0,1916	7,1641

Tableau 4. La vitesse de la germination moyenne (N=20) des graines de pin pignon

Différents régimes	Réponse germinative	Taux de germination(%)	Longueur de tige (cm)
T1	Après 12 jours	86	3, 6
T2	Après 15 jours	80	3
T3	Après 17 jours	45	2,7
T4	Après 20 jours	35	2,5

Tableau 5. Analyse de la variance

Source	DDL	SC	MC	F	Pr>F
Modèle	3	5150.045	1716.682	161.299	< 0.0001**
Erreur	7	74.500	10.643		
Total corrigé	10	5224.545			

** : très significative

ANNEXE 6: Paramètres morphologiques

Tableau 1. Test de Newman-keuls des paramètres morphologiques pour le facteur saison

Facteurs	Modalité	Moyenne estimée	Groupe
LPA	Printemps	34	A
	Eté	27.85	B
	Automne	24.21	C
	Hiver	14	D
LPR	Printemps	42.38	A
	Eté	37.24	B
	Automne	12.74	C
	Hiver	7.68	
PFA	Printemps	38.707	A
	Eté	37.172	
	Automne	17.902	B
	Hiver	8.135	C
PSA	Printemps	40.697	A
	Eté	27.807	B
	Automne	18.91	C
	Hiver	12.565	D
PFR	Printemps	40.26	A
	Automne	24.37	
	Hiver	24.012	B
	Eté	11.82	
PSR	Printemps	41.082	A
	Automne	29.252	B
	Hiver	18.965	C
	Eté	10.132	D

ANNEXE 7: Paramètres biochimiques**Protocoles des marqueurs biochimiques****1-Dosage des pigments chlorophylliens**

La méthode utilisée est celle de Mac Kinney (1941) et Arnon (1949). Elle consiste à prendre 100 mg de la matière fraîche composée des aiguilles de semis de pin pignon et placée dans un tube à essai. On ajoute ensuite 10ml d'une solution préparée à partir 75% d'acétone et de 25% d'éthanol. On les conserve dans des boîtes fermées pendant 48 heures à 30°C et à l'obscurité. La densité optique est mesurée à 663nm pour la chlorophylle (a) et à 645nm pour la chlorophylle (b)

Les concentrations en chlorophylle (a) et (b), exprimées en mg/g-1MF sont données par les deux formules suivantes :

$$\text{Chl (a) (mg/g MF)} = 12.3 \text{ DO (663)} - 0.86 \text{ (645)}/10$$

$$\text{Chl (b) (mg/g MF)} = 9.3 \text{ DO (645)} - 3.6 \text{ (663)}/10$$

2- Dosage des sucres solubles

Les sucres solubles totaux sont dosés par la méthode Dubois et al. (1956). Elle consiste à mettre 100 mg de matériel végétal dans des tubes à essai, on ajoute 3 ml d'éthanol à 80% pour faire l'extraction des sucres, puis on laisse à température ambiante pendant 48 heures à l'obscurité. Au moment du dosage, on filtre le contenu et on ajoute 20ml de l'eau distillée. Dans des tubes en verre, on met 1 ml de la solution à analyser, on ajoute 1 ml de phénol à 5 % puis on ajoute rapidement 5 ml d'acide sulfurique concentré à 1,86N puis on place les tubes au bain-marie pendant 15 à 20mn à une température de 30°C. La lecture de la densité optique est effectuée sur une longueur d'onde de 490nm.

Les teneurs en sucres solubles sont calculées par l'équation suivante :

$$Y = \text{DO} \cdot 1.657 \cdot \text{mol/mg MS}$$

3- Dosage de la proline

La méthode suivie est celle de Troll et Lindsley (1955). Elle consiste à prendre 100 mg du matériel végétal puis place dans un tube à essai. Un volume de 2 ml de méthanol à 40 % est ajouté à l'échantillon, le tout est chauffé à 85°C dans un bain-marie pendant une heure. Après refroidissement, on prélève 1 ml d'extrait auquel il faut ajouter : 2 ml d'acide acétique, 25mg de ninhydrine, 1ml de mélange contenant :

120ml d'eau distillée, 300ml d'acide acétique, 80ml d'acide orthophosphorique, le tout est porté à ébullition à 100°C pendant 30minutes. Après refroidissement, l'ajout de 5ml du toluène et l'agitation au vortex permet de distinguer deux phases (une phase supérieure est une phase inférieure). Après récupération de la phase supérieure, 5mg de sulfate de sodium oxyde (Na₂ SO₄) sont ajoutés pour éliminer l'humidité. Après 48 heures, on détermine par spectrophotomètre la densité optique des échantillons à une longueur d'onde $\lambda = 528\text{nm}$. Les valeurs obtenues sont converties en teneur de proline à partir de la courbe d'étalon dont la relation est la suivante :

$$Y = DO \cdot 0.62 \cdot MS$$

Y : teneur en proline

DO: densité optique

MS : matière sèche

4- Dosage des protéines

Les protéines solubles sont dosées selon la méthode de Bradford (1976), se basant sur le principe qu'en milieu acide les protéines forment des complexes avec certains colorants organiques, le plus souvent les colorants azoïques à groupements acides sulfoniques qui se fixent sur les groupements protonés des chaînes latérales des acides aminés basiques (Lysine-Arginine-Histidine) et sur le α -NH₂ libre de la chaîne polypeptidique pour une structure primaire donnée, le colorant utilisé est le bleu de Coomassie G250, en se liant à la protéine, il est convertit de la forme ronce en la forme bleu. Ce complexe présente un maximum d'absorption à 595 nm. La coloration très sensible, peut être effectuée très rapidement et reste stable pendant 30 mn.

Préparation du réactif de Bradford

- Dissoudre 100 mg de bleu de coomassie G250 dans 50 cm³ d'éthanol à 95% ;
- Rajouter 100 cm³ d'acide phosphorique H₃PO₄ à 85 % ;
- Compléter à 1 dm³ avec l'eau distillée ;
- Conserver à l'obscurité, à la température de laboratoire.

A un volume d'extrait protéique (100µl), on ajoute 1ml de solution de bleu de Coomassie. On laisse la coloration se développer au moins 5 min et au maximum 30 min, l'ensemble est, ensuite, passé au spectrophotomètre pour lire l'absorbance à 595 nm. Dans chaque aliquote la concentration des protéines, en mg/g MF, est déterminée en se référant à la courbe d'étalonnage établit à l'aide de concentrations variées d'une solution de BSA allant de 0 à 250 µg /ml.

La concentration des protéines est déterminée à partir de l'équation de régression de la courbe d'étalonnage. Concentration des protéines en :

$$\text{mg /MF} = 1 / 19.556 \times \text{Absorbance}$$

5- Dosage de l'activité catalase

L'activité de la catalase est mesurée par la diminution de la densité optique à 240 nm ($\epsilon = 0.036 \text{ mM}^{-1} \text{ cm}^{-1}$) due à la consommation de H_2O_2 (Aebi, 1984).

Le milieu réactionnel est formé de :

- $\text{NaH}_2\text{PO}_4 / \text{Na}_2\text{HPO}_4$ (50mM, pH 7) →
- H_2O_2 (10mM)

La réaction est déclenchée par l'ajout de l'extrait protéique. La catalase catalyse la dismutation du peroxyde d'hydrogène en dioxygène et eau selon l'équation suivante:



La catalase utilise H_2O_2 généré par les oxydases tissulaires comme substrat aussi bien qu'un accepteur d'hydrogène. L'activité de la catalase a été mesurée par la méthode de Chance et Maehly (1955). La décomposition de H_2O_2 a été déterminée en suivant le déclin dans l'absorbance à 240 nm pendant 12 min.

Le mélange réactionnel de 3 ml contient 50mM de la solution tampon phosphate (pH 7), 10mM de H_2O_2 fraîchement préparé dans du tampon phosphate 0.5M à pH 7 et 0.1ml de l'extrait enzymatique. La cuve de référence contient le tampon et le H_2O_2 sans l'extrait enzymatique.

6- Dosage de l'activité peroxydase

Les activités de peroxydase ont été mesurées selon la méthode de Chance et Maehly (1955). L'activité enzymatique est suivie en fonction du temps à l'aide d'un spectrophotomètre par mesure de l'absorbance à 470 nm.

L'extraction de la GPX est réalisée à partir de 500 mg de matière végétale fraîche par 6 ml de tampon phosphate (50 mM, pH 7), dans de la glace. Après une centrifugation de 10 min à 5000 g, le surnageant est récupéré et maintenu à 4°C jusqu'à utilisation.

L'activité totale des peroxydases est calculée à partir de l'équation suivante:

$$\text{Activité totale} = (\Delta \text{DO} / \Delta t) \times (1 / \delta) \times (V_c / V_{\text{ext}})$$

V_c : volume de la cuve (1 ml)

V_{ext} : volume de l'extrait protéique

δ : coefficient d'extinction = 26.6 mM / cm

$\Delta \text{DO} / \Delta t$: pente de la courbe de la densité optique en fonction du temps.

L'activité spécifique des peroxydases est calculée à partir de l'équation suivante :

$$\text{Activité spécifique (U/ mg protéine)} = \text{Activité totale} / \text{quantité des protéines}$$

7- Dosage de malonedialdéhyde (MDA)

La peroxydation des lipides est estimée par le dosage des MDA (malondialdéhyde) selon Kramer et al. (1991).

500mg de feuilles sont mises dans une solution tampon phosphate (PH7.8) 5ml dans l'azote liquide et dans un mortier (à froid le tout (dans un bac de glace) . L'homogénat est centrifugé à froid, 20min à 4.000 rpm. Le surnageant ainsi obtenu est utilisé en tant que source de MDA.

La mesure de la concentration des MDA est déterminée en prenant 2ml de TBA 0,6%. Puis on ajoute 1 ml de surnageant, le tout est placé pendant 15min dans un bain marie 95° .pour arrêter la réaction, les tubes sont placés dans la glace puis centrifuger à 4.000 rpm pendant 10 min. L'absorbance est mesurée par un spectrophotomètre à 600, 532 et 450 nm LE contenu en MDA est calculé par la formule suivante : MDA

$$\text{MDA } (\mu\text{mol g}^{-1} \text{ FW}) = 6,45 (\text{Do}532 - \text{Do}600) - 0,56\text{Do}450 \times \text{V/W}$$

V : Volume d'extraction

W : poids frais des feuilles

Tableau 1. Analyse de la variance des paramètres biochimiques pour les hautes températures

	Source	DDL	SC	MC	F	Pr>F
Chlorophylle (a)	Modèle	6	0.213	0.071	172.68	< 0.0001**
	Erreur	11	0.005	0.000	/	/
	Total	14	0.217	/	/	/
Chlorophylle (b)	Modèle	6	0.098	0.033	8.386	< 0.0003**
	Erreur	11	0.043	0.004	/	/
	Total	14	0.141	/	/	/
Chlorophylle totale	Modèle	6	0.316	0.105	22.027	< 0.0001**
	Erreur	11	0.053	0.005	/	/
	Total	14	0.369	/	/	/
Rapport a/b	Modèle	3	0.038	0.013	181.909	< 0.0001**
	Erreur	11	0.001	0.000	/	/
	Total	14	0.039	/	/	/
sucres solubles	Modèle	5	70219.771	111.124	126.381	< 0.0001**
	Erreur	41	4556.064	/	/	/
	Total	46	74775.836	/	/	/
Proline	Modèle	5	36057.730	7211.546	265.579	< 0.0001**
	Erreur	41	1113.315	27.154	/	/
	Total	46	37171.045	/	/	/
Protéines	Modèle	5	4.495	0.899	61.290	< 0.0001**
	Erreur	41	0.601	0.015	/	/
	Total	46	5.096	/	/	/
Catalase	Modèle	3	48.292	16.097	48636.607	< 0.0001**
	Erreur	11	0.004	0.000	/	/
	Total	14	48.295	/	/	/
Activité spécifique de la catalase	Modèle	3	477.312	159.104	84.601	< 0.0001**
	Erreur	11	20.687	1.881	/	/
	Total	14	497.999	/	/	/
Peroxydase	Modèle	3	456.033	152.011	614.389	< 0.0001**
	Erreur	11	2.722	0.247	/	/
	Total	14	458.755	/	/	/
Activité spécifique de la peroxydase	Modèle	3	394.300	132.433	2164319.586	< 0.0001**
	Erreur	11	0.001	0.000	/	/
	Total	14	394.300	/	/	/
Malonedialdéhyde (MDA)	Modèle	3	0.983	0.328	50.969	< 0.0001**
	Erreur	7	0.045	0.006	/	/
	Total	10	1.028	/	/	/

** : très significative

Tableau 2. Analyse de la variance des paramètres biochimiques pour les basses températures

	Source	DDL	SC	MC	F	Pr>F
Chlorophylle (a)	Modèle	4	0.190	0.047	47.789	< 0.0001**
	Erreur	14	0,014	0,001	/	/
	Total	18	0,203	/	/	/
Chlorophylle (b)	Modèle	4	0.074	0.019	10.975	< 0.000**
	Erreur	14	0.024	0.002	/	/
	Total	18	0.098	/	/	/
Chlorophylle totale	Modèle	4	0.494	0.124	57.764	< 0.0001**
	Erreur	14	0.030	0.002	/	/
	Total	18	0.524	/	/	/
Rapport a/b	Modèle	4	0.406	0.101	1274.455	< 0.0001**
	Erreur	14	0.001	0.000	/	/
	Total	18	0.407	/	/	/
sucres solubles	Modèle	6	169420.674	28236.779	305.969	0.0001**
	Erreur	52	4798.892	92.286	/	/
	Total	58	174219.566	/	/	/
Proline	Modèle	5	21896.765	4379.353	434.150	< 0.0001**
	Erreur	33	332.877	10.087	/	/
	Total	38	22229.642	/	/	/
Protéines	Modèle	6	3.430	0.572	76.374	< 0.0001**
	Erreur	52	0.389	0.007	/	/
	Total	58	3.819	/	/	/
Catalase	Modèle	4	2802.505	700.626	11751716	< 0.0001**
	Erreur	14	0.001	0.000	/	/
	Total	18	2802.505	/	/	/
Activité spécifique de la catalase	Modèle	4	2174.003	543.501	335.682	< 0.0001**
	Erreur	14	22.667	1.619	/	/
	Total	18	2196.670	/	/	/
Peroxydase	Modèle	4	382.878	95.720	12446.512	< 0.0001**
	Erreur	14	0.108	0.008	/	/
	Total	18	382.986	/	/	/
Activité spécifique de la peroxydase	Modèle	4	335.789	83.947	289.4.38	< 0.0001**
	Erreur	14	4.061	0.290	/	/
	Total	18	339.850	/	/	/

** : très significative

Tableau 3. Analyse de la variance des paramètres biochimiques pour le stress hydrique

	Source	DDL	SC	MC	F	Pr>F
Chlorophylle (a)	Modèle	3	0.3091	0.1030	18.0026	0.0006
	Erreur	8	0.0458	0.0057	/	/
	Total	11	0.3549	/	/	/
Chlorophylle (b)	Modèle	3	0.5078	0.1693	32.9304	< 0.0001**
	Erreur	8	0.0411	0.0051	/	/
	Total	11	0.5489	/	/	/
Chlorophylle totale	Modèle	3	1.2919	0.4306	90.4913	< 0.0001**
	Erreur	8	0.0381	0.0048	/	/
	Total	11	1.3299	/	/	/
Rapport a/b	Modèle	3	6.2438	2.0813	11.4751	0.0029
	Erreur	8	1.4510	0.1814	/	/
	Total	11	7.6947	/	/	/
sucres solubles	Modèle	3	5485.0601	1828.3534	3.8691	< 0.0001**
	Erreur	32	15121.666	472.5521	/	/
	Total	35	20606.7267	/	/	/
Proline	Modèle	3	1297.9373	432.6458	5.9473	0.0024
	Erreur	32	23327.8999	72.7469	/	/
	Total	35	3625.8372	/	/	/

** : très significative

Tableau 4. Analyse de la variance des paramètres biochimiques pour le stress combiné

Paramètre	Niveau (N1)					
	Source	DDL	SC	MC	F	Pr>F
Chlorophylle (a)	Modèle	3	0.239	0.080	430.514	< 0.0001**
	Erreur	7	0.001	0.000	/	/
	Total	10	0.241	/	/	/
Chlorophylle (b)	Modèle	3	0.212	0.071	996.413	< 0.0001**
	Erreur	7	0.000	0.000	/	/
	Total	10	0.213	/	/	/
sucres solubles	Modèle	5	8821.061	1764.212	51.223	< 0.0001**
	Erreur	29	998.810	344.442	/	/
	Total	34	9819.871	/	/	/
Proline	Modèle	5	840,708	168,142	31,062	< 0.0001**
	Erreur	29	156,981	5,413	/	/
	Total	34	997,688	/	/	/
Niveau (N2)						
Chlorophylle (a)	Modèle	3	0,675	0,225	16065,766	< 0.0001**
	Erreur	7	0.000	0.000	/	/
	Total	10	0,675	/	/	/
Chlorophylle (b)	Modèle	3	0,334	0,111	2666,800	< 0.0001**
	Erreur	7	0.000	0.000	/	/
	Total	10	0,335	/	/	/
sucres solubles	Modèle	5	5985,456	1197,091	33,685	< 0.0001**
	Erreur	29	1030,584	35,537	/	/
	Total	34	7016,040	/	/	/
Proline	Modèle	5	455,819	91,164	23,808	< 0.0001**
	Erreur	29	111,046	3,829	/	/
	Total	34	566,866	/	/	/
Niveau (N3)						
Chlorophylle (a)	Modèle	3	1,162	0,387	67,597	< 0.0001**
	Erreur	7	0,040	0,006	/	/
	Total	10	1,202	/	/	/
Chlorophylle (b)	Modèle	3	0,538	0,179	2010,061	< 0.0001**
	Erreur	7	0.001	0.000	/	/
	Total	10		/	/	/
sucres solubles	Modèle	5	5188,279	1037,656	23,259	< 0.0001**
	Erreur	29	1293,763	44,613	/	/
	Total	34	6482,042	/	/	/
Proline	Modèle	5	138,287	27,657	19,806	< 0.0001**
	Erreur	29	40,496	1,396	/	/
	Total	34	178,783	/	/	/

** : très significative

Nom : TOUABA

Prénom : Chaima

Doctorat 3^{ème} cycle

Titre : Valorisation du Pin pignon (*Pinus pinea L.*) dans la région de Djebel Ouahch-Constantine

Résumé

Le Pin pignon (*Pinus pinea L.*) est une essence forestière à valoriser sur le plan économique par sa production de bois et de pignes. En Algérie, il occupe une superficie totale de 3506 ha, la plus grande surface se trouve dans le massif de Djebel Ouahch 2278 ha.

Ce travail vise essentiellement à statuer sur le développement et l'adaptation de cette essence dans la zone de Djebel Ouahch pour d'éventuels reboisements sous forme de peuplements équiennes avec un âge moyen de 40 ans. La production fructifère moyenne est évaluée entre 3,80 et 523,76 tonnes de pignes en coque; Dans des bonnes conditions, la quantité de cônes récoltés est de 554,110 cône/ha dans la zone étudié. La caractérisation physico-chimique de sol dans la zone d'étude révèle une texture équilibrée, avec un faible taux en argile (environ 27 %), un pH moyen compris entre 6 et 7.5 et un taux de calcaire total très faible.

Sur le plan morphologique, la capacité germinative des graines est de bonne qualité avec une croissance racinaire et aérienne assez soutenue. Ces paramètres morphologiques ont montré une différence statistiquement significative entre les différents traitements et saisons.

Les semis élevé en condition semis contrôlées subissent des stress de courte durée (03 heures) à une gamme de température variant entre -10 °C et 50°C au cours desquelles sont quantifiés les marqueurs biochimiques (chlorophylle, proline, sucres solubles, protéines et des enzymes). Ces résultats qui montrent sous une contrainte thermique, une augmentation des pigments chlorophylliens à 38°C. Les semis présentent une adaptation à températures inférieures à 44°C pour la proline, les sucres solubles, la catalase et MDA. L'intensité de stress hydrique et thermique est significative pour toutes les variables analysées. Les semis de Pin pignon sont aptes à accumuler les différents osmolytes dans les différents organes en réponse au stress combiné. L'accumulation des sucres solubles est bien marquée pour le témoin et à 38°C; alors que l'augmentation de la proline est significative dans les racines à la contrainte thermique à 38°C au niveau N1 et 44°C au niveau N2 (55%). Les semis manifeste effectivement des traits d'adaptation biochimique en réponse aux fluctuations combinées, hydriques et thermiques.

L'analyse de la phénologie a été observée sur des branches d'une croissance comprise entre 15-20 ans dans la région de Provence-Alpes-Côte d'Azur, et dans la région de Djebel Ouahch. L'exclusion de pluie a diminué le nombre annuel de cycles de croissance des pousses et leur durée et aussi la vitesse de croissance des aiguilles.

La qualité des peuplements de Pin pignon est moyennement stable, un taux de régénération faible, et le taux de mortalité assez fort due à l'action anthropique et aux incendie.

Mots clés: Pin pignon, Djebel Ouahch, croissance, phénologie, stress thermique, stress hydrique, marqueurs biochimiques .

Laboratoire de recherche : Développement et valorisation des ressources phytogénétiques

Directeur de thèse : Prof. ALATOU Djamel

Année universitaire : 2017/2018