



UNIVERSITE
Abdelhamid Ibn Badis
MOSTAGANEM

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
جامعة عبد الحميد بن باديس مستغانم
Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem
كلية العلوم الطبيعية و الحياة
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
قسم العلوم الزراعية
Département des Sciences Agronomiques
Filière : Sciences Agronomiques
Option : Eau, Sol et Environnement

Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat en sciences

Présenté par : Mr BOULENOUAR Houari

Thème

Etude du potentiel de production des peuplements
artificiels de Pin Pignon (*Pinus pinea* L.) dans l'Ouest
Algérien

Composition du jury de soutenance

Nom et prénom	Grade	Qualité	Structure
Mr. LARID Mohamed	Prof.	Président	Université de Mostaganem
Mr. HADDAD Ahmed	Prof.	Encadreur	Centre universitaire d'El-bayadh
Mr. NASRALLAH Yahia	Prof.	Examineur	Université de Saida
Mr. MEDJAHDI Boumedienne	Prof.	Examineur	Université de Tlemcen
Mr. BOUALEM Abdelkader	MCA	Examineur	Université de Mostaganem

Remerciements

Je tiens à exprimer mon respect et ma gratitude à Monsieur le **professeur Haddad Ahmed** mon directeur de thèse. Je le remercie vivement de m'avoir mis sur les rails de la recherche. Son aide, ses orientations, ses suggestions, ses conseils et ses critiques constructives, m'ont vraiment aidé à élaborer cette thèse.

Je tiens à exprimer ma grande reconnaissance et mon inestimable gratitude aux honorables personnes qui m'ont consacré leur savoir, leurs compétences et leur disponibilité en prenant part à l'élaboration et à l'examen de ce travail :

Messieurs les membres de jury :

Pr. LARID Mohamed

Pr. NASRALLAH Yahia

Pr. MEDJAHDI Boumedienne

Pr. BOUALEM Abdelkader

J'exprime ma profonde reconnaissance et gratitude à **Mr Berkane Ibrahim**, pour son aide précieuse et sa contribution à la réalisation de ce travail.

Mes sincères remerciements à mes enseignants, mes collègues de la promotion pour leurs soutiens moraux.

Merci à vous tous et à tous ceux que je n'ai pas mentionnés mais auxquels je pense très fort.

Dedicace

Je dédie cette thèse de Doctorat :

A la mémoire de mes parents, que Dieu le tout puissant

l'accueille dans son vaste paradis

*A Ma femme et Mes enfants « Chahdouda et Mohamed
Bahaeddine »*

A Mes frères et sœurs,

Mes ami(e)s,

A toute ma famille.

A Ceux qui m'ont donné l'aide sans rien attendre en retour.

A ceux qui m'ont encouragé et soutenu aux moments les

plus difficiles.

.....A tous ceux qui me sont chers (es).

Résumé

Dans le but d'une meilleure connaissance du potentiel de production des peuplements de pin pignon dans la région de Mostaganem (ouest algérien) et l'identification de certains facteurs pouvant avoir une influence sur la productivité de cette espèce, nous avons entrepris cette étude. Le site index basé sur la hauteur dominante est la mesure la plus couramment employée pour déterminer la productivité ou le potentiel de production d'un peuplement, fournissant des informations clés. Soixante-douze (72) placettes circulaires de (4-6 ares) de surface ont été installées en fonction de l'âge et de la densité. Ces placettes ont fait l'objet d'un inventaire dendrométrique complet (hauteur totale, diamètre du houppier, circonférence à 1.30 m, âge, etc.), une description écologique (profondeur du sol, altitude, aspect et pente) et une étude de la production de cônes et de graines.

Il a été constaté que cette espèce est caractérisée par une structure régulière formant des populations jeunes. Les relations entre les paramètres tels que la hauteur totale moyenne/la circonférence moyenne, le diamètre moyen du houppier/le diamètre à 1.30 m et la surface terrière/le diamètre moyen du houppier étaient très positives et significatives. Trois (03) classes de productivité à l'âge de référence de 70 ans ont été identifiées (9 m, 12 m et 15 m). Les résultats concernant la production fruitière ont montré que les cônes les plus lourds et de grandes tailles contiennent un plus grand nombre de graines et de pignons, ainsi que cette production est influencée par la hauteur et le diamètre, notamment du houppier et l'état social de l'arbre. En complément, l'analyse en composantes principales a révélé l'effet des facteurs écologiques, en particulier la profondeur du sol et l'altitude sur les paramètres dendrométriques et la production fruitière du pin pignon.

Mots clés : pin pignon, paramètres dendrométriques, hauteur dominante, classes de productivité, facteurs écologiques, production fruitière.

Abstract

In order to gain a better understanding of the production potential of stone pine stands in the Mostaganem region (western Algeria) and to identify some factors that may influence the productivity of this species, we undertook this study. The site index based on the dominant height is the most commonly used measure to determine the productivity or production potential of a stand, providing key information. Seventy-two (72) circular plots of (4-6 a) in area were set up according to age and density. These plots were subjected to a complete dendrometric inventory (total height, crown diameter, girth at 1.30 m, age, etc.), an ecological description (soil depth, altitude, aspect and slope) and a study of cone and seed production.

It was found that this species is characterised by a regular structure forming young populations. Relationships between parameters such as mean total height/mean girth, mean crown diameter/diameter at 1.30 m and basal area/mean crown diameter were very positive and significant. Three (03) productivity classes at the reference age of 70 years were identified (9 m, 12 m and 15 m). The results concerning fruit production showed that the heaviest and largest cones contain a greater number of seeds and pine nuts, and that this production is influenced by height and diameter, especially of the crown and the social status of the tree. In addition, principal component analysis revealed the effect of ecological factors, in particular soil depth and altitude on dendrometric parameters and fruit production of stone pine.

Key words: stone pine, dendrometric parameters, dominant height, productivity classes, ecological factors, fruit production.

ملخص

تهدف هذه الدراسة الى معرفة أفضل للإمكانات الإنتاجية لتجمعات الصنوبر الثمري في منطقة مستغانم (غرب الجزائر) والى تحديد بعض العوامل التي قد يكون لها تأثير على إنتاجية هذا النوع. يعد مؤشر الموقع المستند إلى الارتفاع السائد هو المقياس الأكثر استخدامًا لتحديد الإنتاجية أو إمكانات الإنتاج لتجمع ما موفرا معلومات أساسية. تم وضع (72) قطعة دائرية بمساحة (4-6 آر) حسب العمر والكثافة. خضعت هذه قطع الى جرد شجري كامل (الارتفاع الكلي ، قطر التاج ، المحيط عند 1.30 متر ، العمر ، إلخ) ، ووصف بيئي (عمق التربة ، الارتفاع ، الجانب والمنحدر) ودراسة لإنتاج المخاريط والبذور.

وجد أن هذا النوع يتميز ببنيته المنتظمة مشكلا تجمعا غابيا فتي. العلاقات بين المعلمات مثل متوسط الارتفاع الكلي / متوسط المحيط ومتوسط قطر التاج / القطر عند 1.30 متر والمساحة القاعدية / متوسط قطر التاج، كانت إيجابية للغاية وبارزة. تم تدرج ثلاث (03) فئات خصوبة عند سن مرجعي 70 سنة (9 م، 12 م، 15 م). أظهرت النتائج المتعلقة بإنتاج الثمار أن المخاريط الأكبر حجمًا والأثقل تحتوي على عدد أكبر من البذور والحبوب ، كما أن هذا الإنتاج متعلق بطول وقطر ، بالأخص التاج والحالة الاجتماعية للشجرة. بالإضافة إلى ذلك ، كشف تحليل المكون الرئيسي عن تأثير العوامل البيئية ، لا سيما عمق التربة والارتفاع على معايير قياس الشجرة وإنتاج ثمار الصنوبر.

الكلمات المفتاحية: صنوبر الثمري ، معايير قياس الشجرية، ارتفاع السائد ، فئات خصوبة ، عوامل بيئية ، إنتاج الثمار.

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Présentation du pin pignon	
1. Généralités.....	4
2. Aire de répartition du pin pignon	4
2.1. Répartition en Algérie	5
3. Description botanique du pin pignon	7
3.1. Taxonomie et génétique.....	7
3.1.1. Taxonomie	7
3.1.2. Variation génétique du pin pignon.....	7
3.2. Morphologie du pin pignon	8
3.2.1. Description générale	8
3.2.2. Architecture de l'arbre.....	9
3.2.3. Structures reproductives.....	10
4. Biologie du pin pignon.....	11
4.1. Maturité reproductive	11
4.2. Développement reproductif	12
4.3. Dispersion des graines dans les habitats naturels	13
4.4. Germination	14
4.5. Croissance.....	15
5. Écologie du pin pignon	16
5.1. Climat	16
5.1.1. Températures.....	16
5.1.2. Précipitations.....	17
5.2. Préférences édaphiques.....	17
6. Utilisations du pin pignon	18
6.1. Reboisement de protection	18
6.2. Production du bois	18
6.3. Production de fruits	19
6.3.1. Forêts et zones boisées de pin pignon.....	19
6.3.2. La production de cônes	20
6.3.3. Marché des pignons de pin	21

7. Gestion Sylvicole	23
7.1. Installation des semis et élevage des plants	23
7.2. Plantation et préparation du sol	23
7.3. Densité de plantation	24
7.4. Entretien et fertilisation.....	24
7.5. Elagage	25
7.6. Eclaircies	25
7.7. Greffage	25
8. Pathologie du pin pignon.....	26
8.1. Les insectes.....	26
8.1.1. La chenille processionnaire (<i>Thaumetopoea pityocampa Schiff</i>)	26
8.1.2. La pyrale du pin (<i>Dioryctria mendacella Stgr</i>).....	26
8.1.3. La pyrale du pin (<i>Dioryctria pineae Stgr</i>)	27
8.1.4. Le pissode du pin (<i>Pissodes notatus Fab</i>)	27
8.1.5. Le pissode du pin (<i>Pissodes validirostris Gyll</i>)	27
8.1.6. Les Scolytes du pin	27
8.1.7. <i>Lymantria dispar</i>	27
8.1.8. <i>Ernobius anatolicus</i>	27
8.1.9. La punaise américaine du pin (<i>Leptoglossus Occidentalis</i>).....	27
8.2. Les champignons	28
8.2.1. <i>Sphaeropsis sapinea</i> ou <i>Diplodia pinea</i>	28
8.2.2. <i>Melanpsora pinitorqua Rostr</i>	28
8.2.3. <i>Thyriopsis halepensis</i>	28
8.2.4. <i>Cronartium flaccidum (Alp, Schw)</i>	29
8.2.5. <i>Armillaria mellea (Alp, Schw)</i>	29
9. Résistance du pin pignon aux incendies.....	29

Chapitre II: Estimation du potentiel de production forestière

1. Généralités.....	30
2. Objectifs d'estimation de la productivité forestière	30
2.1. Aménagement forestier.....	30
2.2. Recherche sylvicole	30
2.3. Recherche écologique et gestion de l'environnement.....	31
3. Les concepts de productivité forestière, de site, de qualité et productivité de site	32

3.1. Productivité forestière.....	32
3.2. Site	33
3.3. Qualité de site	33
3.4. Productivité de site	33
4. Approches de l'évaluation de la productivité forestière	34
5. Évolution de l'estimation de la productivité des sites forestiers	35
5.1. Classification des sites en fonction de la hauteur des peuplements	35
5.2. La loi d'Eichhorn	39
5.3. L'hypothèse de la réaction aux éclaircies	39
6. Principales méthodes quantitatives d'estimation et indices de productivité.....	41
6.1. Méthodes dendrométriques directes	41
6.1.1. Productivité basée sur la production totale en volume	41
6.1.2. Productivité basée sur l'accroissement annuel moyen total en volume.....	42
6.1.3. Productivité basée sur l'accroissement périodique en volume	42
6.2. Méthodes dendrométriques indirectes	42
6.2.1. Productivité basée sur la hauteur dominante d'un peuplement.....	42
6.2.2. Productivité basée sur la croissance périodique en hauteur.....	43
6.3. Méthodes mixtes.....	43
7. Estimation de la production fruitière des espèces ligneuses	44
7.1. Comptage du nombre total de fruits à travers la récolte intégrale des fruits	44
7.2. Comptage des fruits tombés sous l'arbre à travers un ramassage périodique des fruits	44
7.3. Comptage par extrapolation.....	44

Chapitre III : Présentation de la zone d'étude

1. Généralités.....	46
2. Situation géographique.....	46
3. Caractéristiques physiques	47
3.1. Cadre morphologie	47
3.1.1. Le cordon littoral.....	47
3.1.2. Les monts du Dahra	47
3.1.3. La vallée du Chélif.....	47
3.1.4. Le plateau de Mostaganem	48
3.2.5. Les collines sublittorales.....	48
3.1.6. La plaine des Bordjias.....	48

3.2. Les pentes	49
3.3. L'exposition.....	51
3.4. L'altitude	52
4. Caractéristiques géologiques.....	53
4.1. Le cordon littoral	53
4.2. Les monts du Dahra	53
4.3. La vallée du Chélif	54
4.4. Le plateau de Mostaganem	54
4.5. Les collines sublittorales	55
4.6. La plaine des Bordjias	55
5. Caractéristiques hydrologiques	56
5.1. Réseau hydrographique	56
5.2. Ressources en eau superficielles.....	57
5.2.1. Barrages	57
5.2.2. Retenues collinaires	57
5.3. Ressources en eau souterraines.....	57
5.4. Ressources en eau non conventionnelles.....	57
5.4.1. Eaux de dessalement	57
5.4.2. Eaux usées épurées	58
6. Agriculture	58
6.1. Production végétale	58
6.2. Production animale	58
7. Caractérisation générale des formations forestières de la région de Mostaganem	60
7.1. Importance des terres forestières	60
7.2. Localisation	60
7.3. Répartition par essence	60
7.4. Types des formations forestières	61
8. Caractéristiques climatiques.....	62
8.1. Etude des paramètres climatiques.....	63
8.1.1. Précipitations.....	63
8.1.2. Régimes saisonniers.....	64
8.1.3. Les températures	65
8.2. Aspect bioclimatique	65

8.2.1. Indice d'aridité de De Martonne	66
8.2.2. Indice de continentalité ou amplitude thermique	67
8.2.3. Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen.....	67
8.2.4. Indice xérothermique d'Emberger	68
8.2.5. Quotient pluviométrique d'Emberger	69
8.2.6. Synthèse bioclimatique	70

Chapitre IV : Matériel et Méthodes

1. Introduction	72
2. Mise en place du dispositif expérimental	73
2.1. Assiette des placettes	73
2.2. Caractéristiques stationnelles	74
2.3. Caractéristiques dendrométriques.....	75
2.3.1. Mesure de la circonférence à 1.30 m	75
2.3.2. Mesure de la hauteur totale	75
2.3.3. Mesure du diamètre et de la hauteur du houppier	76
2.3.4. Mesure de l'âge des arbres.....	76
2.3.5. Mesure des variables transformées	77
3. Étude de la croissance en hauteur dominante des peuplements de pin pignon	79
3.1. Indices et établissement des courbes de productivité	79
3.2. Anamorphisme et polymorphisme.....	80
3.3. Approche de modélisation de site index	81
3.3.1. Modèles de site index basés sur la méthode ADA.....	81
3.3.2. Modèles de site index basés sur la méthode GADA.....	82
3.3.3. Modèle avec variables de site	85
3.4. Paramètres d'ajustement des modèles	86
5. Production de cônes et de graines	87
6. Analyses des données et traitements statistiques	89

Chapitre V: Résultats et Discussions

1. Caractéristiques dendrométriques et écologiques des placettes d'étude.....	90
2. Structure globale du peuplement.....	91
3. Relation entre les paramètres dendrométriques	92
3.1. Relation entre la hauteur totale et la circonférence	92
3.2. Relation entre le diamètre de houppier et le diamètre à hauteur poitrine.....	93

3.3. Relation entre la surface terrière et les deux paramètres, DHP et Diamètre de houppier	94
4. Influence des facteurs écologiques sur la croissance et la productivité du pin pignon	95
5. Modélisation de la croissance du pin pignon	97
5.1. Modèle de base	97
5.1.1. Choix d'un modèle de base	97
5.1.2. Courbes de croissance du pin pignon du modèle de base	100
5.2. Modèle dynamique	102
5.2.1. Choix du modèle dynamique	102
5.2.2. Courbes de croissances du modèle dynamique.....	106
5.3. Modèle avec variables de site	106
5.3.1. Sélection des variables de site.....	106
5.3.2. Paramètres d'ajustement du modèle avec variables de site	107
5.4. Comparaison entre modèles de base et dynamique	108
5.4.1. Comparaison entre les paramètres d'ajustement.....	108
5.4.2. Comparaison entre les courbes de croissance du modèle de base et celles du modèle dynamique	108
5.4.3. Comparaison entre les accroissements moyens annuels du modèle de base et ceux du modèle dynamique	109
5.5. Comparaison des résultats obtenus avec les autres études	110
6. Production fruitière des peuplements étudiés.....	112
6.1. Caractéristiques des fruits du pin pignon des peuplements étudiés.....	112
6.2. Corrélation entre les caractéristiques des fruits de l'espèce étudiée.....	114
6.3. Relation entre la production fruitière et les paramètres dendrométriques du pin pignon	114
6.3.1. Relation entre le nombre moyen de cônes par arbre et la hauteur moyenne et diamètre moyen de houppier.....	115
6.3.2. Relation entre le nombre moyen de cônes par arbre et la hauteur moyenne et dominante de l'espèce étudiée	116
6.3.3. Relation entre le nombre moyen de cônes par arbre et les circonférences moyennes à 1.30 m et dominantes de l'espèce étudiée	116
6.3.4. Relation entre le nombre moyen de cônes par arbre et les deux paramètres, nombre de tige par hectare et surface terrière	117
6.4. Influence des facteurs écologiques sur la production fruitière	118
6.5. Etat sanitaire des cônes.....	120

6.6. Comparaison des résultats obtenus avec les autres études	121
Conclusion générale	123
Références bibliographiques	
Annexes	

Liste des abréviations

- ACP** : Analyse en composantes principales
- AEP** : Alimentation en eau potable.
- AIC** : Akaike information criterion
- BNEDR** : Bureau national d'étude pour le développement rural
- CDA** : Diamètre moyen d'houpier
- Cdom** : Circonférence dominante
- CFM** : Conservation des forêts de Mostaganem
- CMR** : Carré moyen résiduel
- CV** : Coefficient de variation
- DREW** : Direction des ressources en eau de la wilaya
- DSA** : Directions des services agricoles
- EAM** : Erreur absolue moyenne
- FAO** : Food and agriculture organization
- G** : Surface terrière du peuplement
- GPS** : Globale position système
- IFN** : Inventaire forestier national
- ONM** : Office nationale de météorologie
- SAT** : Surface agricole totale
- SAU** : Surface agricole utile
- SCR** : la somme des carrés des résidus
- SCT** : la somme des carrés totaux
- SIG** : Systèmes d'information géographique
- TPF** : Tranchée pare-feu
- UTM** : Universal transvers mercator.

Liste des figures

Figure 1. Aire de répartition géographique du pin pignon dans le monde	5
Figure 2. Répartition des principales plantations du pin pignon en Algérie.....	6
Figure 3. Pin pignon à Tiaret (droite) et Chlef (gauche)	6
Figure 4. Pin pignon, cônes males (droite) et cône femelle (gauche).....	11
Figure 5. Le cycle reproductif des cônes de pin pignon (Mutke et al., 2003).	13
Figure 6. Pin pignon, graines (droite) et pignons (gauche).	14
Figure 7. Situation géographique de la zone d'étude	46
Figure 8. Unités géomorphologiques de la zone d'étude.	49
Figure 9. Carte des pentes de la région de Mostaganem.	50
Figure 10. Carte des expositions de la région de Mostaganem.	51
Figure 11. Carte des altitudes de la région de Mostaganem.	53
Figure 12. Carte du réseau hydrologique de la région de Mostaganem.	56
Figure 13. Variation des températures moyennes mensuelles de la région de Mostaganem.....	65
Figure 14. Indice d'aridité de De Martonne.	66
Figure 15. Diagramme Ombrothermique de Bagnouls et Gausson (Mostaganem).	68
Figure 16. Place de la zone d'étude dans le Climagramme de L. Emberger.	70
Figure 17. Sechage des cônes et extraction des graines.	88
Figure 18. Histogramme de fréquences du Pin pignon en fonction des classes de circonférences ($C_{1.30m}$).	91
Figure 19. Evolution de hauteur totale en fonction de la circonférence à 1.30 m des placettes étudiées.	92
Figure 20. Relations diamètre houppier-diamètre à 1.30 m et diamètre moyen de houppier-diamètre moyen à 1.30 m des placettes étudiées.....	93
Figure 21. Relation surface terrière-diamètre moyen à 1.30 m et la relation surface terrière-diamètre moyen d'houppier des placettes étudiées.	94
Figure 22. Cercle de corrélation entre les variables dendrométriques et écologiques.....	96
Figure 23. Répartition des valeurs de la hauteur dominante en fonction de l'âge.....	97
Figure 24. Histogramme (droite) et Diagrammes (gauche) de dispersion des résidus.	99
Figure 25. Courbes de croissance en hauteur dominante du pin pignon (Modèle de base).....	102
Figure 26. Courbes de croissance en hauteur dominante du pin pignon (modèle dynamique)	106
Figure 27. Courbes de croissance en hauteur issues du modèle de base (I) par rapport à celles obtenues à partir du modèle dynamique (SI).	109

Figure 28. Les accroissements moyens annuels calculés sur la base du modèle dynamique (gauche) et du modèle de base (droite)	110
Figure 29. Courbes de croissance de pin pignon de trois modèles présentés par Sghaier et al (2012), Piqué (2003) et Calama et al (2003).....	111
Figure 30. Relation entre le nombre moyen de cônes par arbre et la hauteur moyenne et diamètre moyen de houppier	115
Figure 31. Relation entre le nombre moyen de cônes par arbre et la hauteur moyenne et dominante de l'espèce étudiée.	116
Figure 32. Relation entre le nombre moyen de cônes par arbre et la circonférence moyenne à 1.30 m et dominante de l'espèce étudiée.	117
Figure 33. Relation entre le nombre moyen de cônes par arbre et les deux paramètres, nombre de tiges par hectare et surface terrière.	118
Figure 34. Cercle de corrélation entre les variables écologiques et les caractéristiques des fruits de pin pignon.....	120

Liste des tableaux

Tableau 1. Position taxonomique du pin pignon.....	7
Tableau 2. Répartition par pays du nombre de provenances comparées.....	8
Tableau 3. Répartition des classes des pentes de la région de Mostaganem.	49
Tableau 4. Classes d'altitude de la région Mostaganem.	52
Tableau 5. Les barrages en exploitation au niveau de la région de Mostaganem.	57
Tableau 6. Répartition de la superficie agricole utile de la zone d'étude (ha) (DSA, 2022).....	58
Tableau 7. Capacités de la production animale.	59
Tableau 8. Evolution de la production agricole de trois dernières années.	59
Tableau 9. Les formations forestières de la région de Mostaganem.	60
Tableau 10. Coordonnées de la station météorologique de Mostaganem.	63
Tableau 11. La pluviométrie moyenne.	63
Tableau 12. Régime et coefficient relatif saisonnier de Musset.....	64
Tableau 13. Indice de continentalité ou amplitude thermique.	67
Tableau 14. Indice xérothermique d'Emberger.....	68
Tableau 15. Quotient pluviothermique d'Emberger.....	69
Tableau 16. Placettes d'échantillonnage.	74
Tableau 17. Modèles de base testés.....	85
Tableau 18. Caractéristiques des fruits du pin pignon.	88
Tableau 19. Caractéristiques dendrométriques et écologiques des placettes étudiées.	90
Tableau 20. Matrice de corrélation entre les variables dendrométriques et écologiques.	95
Tableau 21. Tests arithmétiques des trois premiers modèles de base.	98
Tableau 22. Tests de normalité des résidus des trois premiers modèles de base.	98
Tableau 23. Valeurs des paramètres du modèle de Johnson-Schumacher en fonction des indices de productivité prédéterminés I_0	101
Tableau 24. Valeurs des hauteurs dominantes (m) en fonction des âges pour les 03 sites index.....	101
Tableau 25. Modèles de base et équations dynamiques testées.	103
Tableau 26. Résultats d'ajustement des modèles dynamiques.	105
Tableau 27. La matrice de corrélation entre les variables de site et le site index.	106
Tableau 28. Comparaison entre les paramètres d'ajustement des modèles avec et sans variables de site.	107
Tableau 29. Caractéristiques des fruits du pin pignon des placettes étudiées.	113
Tableau 30. Corrélation des caractéristiques des fruits de l'espèce étudiée.....	114
Tableau 31. La matrice de corrélation entre les paramètres écologiques et les caractéristiques des fruits de pin pignon.....	119

INTRODUCTION
GENERALE

Introduction générale

La planification et la mise en œuvre de la gestion durable des forêts exigent qu'un ensemble de conditions écologiques, économiques et sociales soient évaluées et examinées avec soin. Dans le cadre de ce processus, les gestionnaires et les planificateurs forestiers résument les informations sur l'état actuel et l'état futur prévu des peuplements forestiers à l'aide de divers indicateurs sélectionnés pour leur utilité dans l'évaluation des conséquences de différentes actions de gestion. Dans de nombreuses situations, des estimations fiables du potentiel de production forestière sont essentielles à la gestion durable des forêts (Skovsgaard et Vanclay, 2008). Ces estimations dépendent de la composition des essences, des pratiques sylvicoles, de la productivité du site et de la détermination du rendement (produits ligneux et non-ligneux) (Pretzsch et al., 2008).

La productivité d'un site est généralement évaluée à l'aide d'un site index, déterminé à partir de la hauteur dominante à un âge prédéterminé, appelé âge de référence (Monserud et al., 1990 ; Weiskittel et al., 2011). Les modèles de site index sont également utilisés pour prévoir la croissance des peuplements forestiers et pour classer les sites et de les comparer entre eux. Donc le développement de ces modèles est l'une des tâches essentielles de la recherche forestière. (Mathiasen et al., 2006 ; Pretzsch et al., 2008). La hauteur dominante est couramment utilisée pour construire les courbes de site index car elle est : facile à déterminer sur le terrain, étroitement corrélée avec la production en volume, indique la qualité du peuplement pour tous les âges et relativement indépendante de la densité du peuplement et des traitements sylvicoles appliqués (Clutter et al., 1983).

Les études sur la variabilité des produits non-ligneux est très importantes, en particulier de celles qui se concentrent sur le rendement de cônes en graines et en pignons. Ainsi, les pignons sont très appréciés et de plus en plus demandés par l'industrie alimentaire, atteignant des prix élevés dans le monde entier (Fady et al., 2004).

Le pin pignon (*Pinus pinea* L), est l'une des espèces d'arbres les plus caractéristiques du paysage méditerranéen en raison de sa forme fabuleuse de parapluie et de l'utilisation ancienne de ses grosses graines comestibles ressemblant à des noix pour la consommation humaine. Il est très répandu dans les forêts et les bois méditerranéens, et il est exploité depuis le Paléolithique pour ses graines comestibles (Badal, 2001 ; Finlayson et al., 2006). Adaptées aux environnements secs, les forêts de pin pignon sont importantes pour la protection des bassins versants et des sols, notamment pour la stabilisation des dunes. En terme de biodiversité, ses forêts constituent des habitats pour certaines espèces menacées, comme le

lynx ibérique, l'aigle impérial ibérique, le vautour noir, le faucon pèlerin et la cigogne noire (Notario et al., 1999). Une autre caractéristique marquante de cette espèce dans le paysage méditerranéen est sa présence sous forme d'arbres isolés, dans les ruisseaux et les alignements d'arbres en bordure de route, ou dans de petits bosquets ruraux. Il s'agit d'éléments structurels du paysage, qui interrompent l'uniformité et la grande étendue des terres agricoles céréalières par des îlots d'arbres à feuilles persistantes, et qui jouent donc un rôle écologique important en fournissant de la nourriture, des abris et des passages pour de nombreuses espèces animales, en particulier pour les oiseaux (SEO, 1999).

Le pin pignon est aussi un arbre horticole, cultivé à des fins ornementales, d'ombrage, et pour les graines depuis l'antiquité. Cependant, peu d'efforts semblent avoir été faits pour sa domestication correcte en tant que culture de noix. Il n'existe pas de variétés définies, et la quasi-totalité de la production actuelle de pin pignon est encore récoltée à l'état naturel dans des peuplements forestiers, où aucune technique de culture n'est appliquée, à l'exception des pratiques sylvicoles qui contrôlent la composition et la densité des peuplements. Même les petits bosquets de pins ou les arbres isolés, si typiques des paysages ruraux de la Méditerranée, sont généralement cultivés par semis sans origine connue. Ainsi, le pin pignon est essentiellement une espèce collectée à l'état spontané. Ce n'est qu'au cours des dernières décennies que des efforts croissants ont été consacrés à la sélection clonale et à la production dans des vergers greffés (Prada et al., 1997 ; Mutke et al., 2000).

En Algérie, le pin pignon se trouve sous forme de reboisement dans différentes régions (littorales, sub-littorales, ...) couvrant une superficie totale de 4 480 ha (IFN, 2017). Ces plantations ont révélé que les potentialités d'adaptation et d'acclimatation de cette essence et la capacité de l'espèce de coloniser des milieux aussi difficiles.

Toutefois, le pin pignon en Algérie reste méconnu. Peu d'études scientifiques sont disponibles actuellement sur le potentiel de production, le modèle de croissance, les classes de productivité et la production fruitière. Ce qui nous a incités à entreprendre cette recherche sur les peuplements les plus importants de l'Ouest algérien et qui sont situés dans la région de Mostaganem, occupant une superficie totale d'environ 407 ha (IFN, 2017). Cette espèce a été utilisée pour le reboisement dans la région de Mostaganem depuis la colonisation française pour lutter contre l'érosion des sols à Bel hacel et Bouchria. Le succès de ces premières plantations a encouragé les forestiers à utiliser cette espèce pour assurer le couvert végétal des dunes côtières de Stidia et Ain Brahim depuis 1972 (IFN, 2017).

Dans le but d'une meilleure connaissance du potentiel de production des peuplements de pin pignon dans l'Ouest algérien et l'identification de certains facteurs pouvant avoir une influence sur la productivité de cette espèce, nous avons entrepris cette étude, dont l'objectif principal est d'évaluer et d'estimer de manière fiable les potentialités réelles qu'offre le pin pignon dans la région de Mostaganem et de préciser les relations entre cette productivité et les facteurs écologiques qui l'influencent. Dans une autre optique, afin de prévoir la croissance des peuplements étudiés, et d'apprécier la productivité de l'espèce, nous avons établi un modèle de croissance en hauteur dominante comme indicatrice de fertilité. Finalement, la production de cônes et de graines a été étudiée en fonction des différents paramètres dendrométriques (âge, diamètre de houppier, densité, hauteur...) et les facteurs écologiques (profondeur du sol, altitude...).

Pour mener à bien ces objectifs, le présent travail comprend cinq chapitres : dans le premier, nous présentons les différentes caractéristiques du pin pignon ; le deuxième chapitre comprendra un aperçu sur l'estimation forestière et les différentes notions qui lui sont associées ; le troisième chapitre présentera la zone d'étude à travers ses composantes ; le quatrième traitera la méthodologie d'élaboration d'un modèle expérimental permettant la description et l'analyse du potentiel de production du pin pignon ; et le dernier chapitre consacrera à la discussion des résultats obtenus et qui est structuré en quatre sous-chapitres. Dans le premier, nous avons analysé les caractéristiques dendrométriques et écologiques des peuplements étudiés. Le second s'intéresse à l'élaboration d'un modèle de croissance en hauteur dominante, alors que le troisième vise à l'étude de la production fructifère en relation avec certaines caractéristiques des peuplements.

CHAPITRE I
Présentation du
Pin pignon

1. Généralités

Le pin pignon (*Pinus pinea*), reconnaissable à son port évoquant un parasol ouvert, est une espèce typiquement méditerranéenne. Sa superficie totale dans le monde est estimée à 700 000 ha (Mutke et al., 2012). Son aire de répartition s'étend du Portugal à la Syrie et le long de certaines zones côtières de la mer Noire. Il se trouve à l'état pur ou mélangé avec du pin maritime (*Pinus pinaster* Ait) ou avec d'autres espèces d'arbustes telles que le genévrier (*Juniperus*), et le chêne (*Quercus*) (Barbeito, 2009). Cette espèce est utilisée depuis l'antiquité pour son importance économique, comme une source de bois d'œuvre, de bois de chauffage, d'écorces, de résines et de pignons comestibles. En outre, le pin pignon fournit d'importants services écologiques, paysagers et récréatifs, en raison de sa capacité à pousser sur les dunes continentales et côtières. En effet, il a été largement utilisé pour la lutte contre l'érosion des sols.

2. Aire de répartition du pin pignon

Autour de la mer Méditerranée, il y a actuellement environ 0.7 million d'hectares de forêts dominées par le pin pignon, éparpillées depuis la côte atlantique du Portugal jusqu'aux rives de la mer Noire et du Mont Liban. Les principales zones de distribution se trouvent en Espagne (470 000 ha), au Portugal (80 000 ha), en Turquie (50 000 ha) et en Italie (40 000 ha). Plus de la moitié de cette superficie est le résultat d'un reboisement de protection (Martinez et al., 2004).

À l'heure actuelle, l'aire naturelle et son développement en tant qu'archéophyte protohistorique restent inconnus (Rikli, 1943 ; Feinbrun, 1959 ; Thirgood, 1981 ; Gil, 1999) et c'est une question qui n'a pas été résolue par la génétique moléculaire (Fallour et al., 1997 ; Vendramin et al., 2008).

La distribution du pin pignon s'est probablement développée à partir de plusieurs endroits dans le nord de la Méditerranée, avec une présence au Tertiaire supérieur soutenue par des preuves fossiles dans la péninsule ibérique et même en Autriche (Menendez Amor, 1951 ; Klaus, 1989). Dans le sud de la France et en Espagne, le pin pignon a fait partie intégrante de la dynamique de l'habitat des forêts ouvertes et des steppes à la fin du Quaternaire (Bazile-Robert, 1981 ; Gil, 1999 ; Badal, 2001 ; Finlayson et al., 2006 ; Carrion et al., 2009).

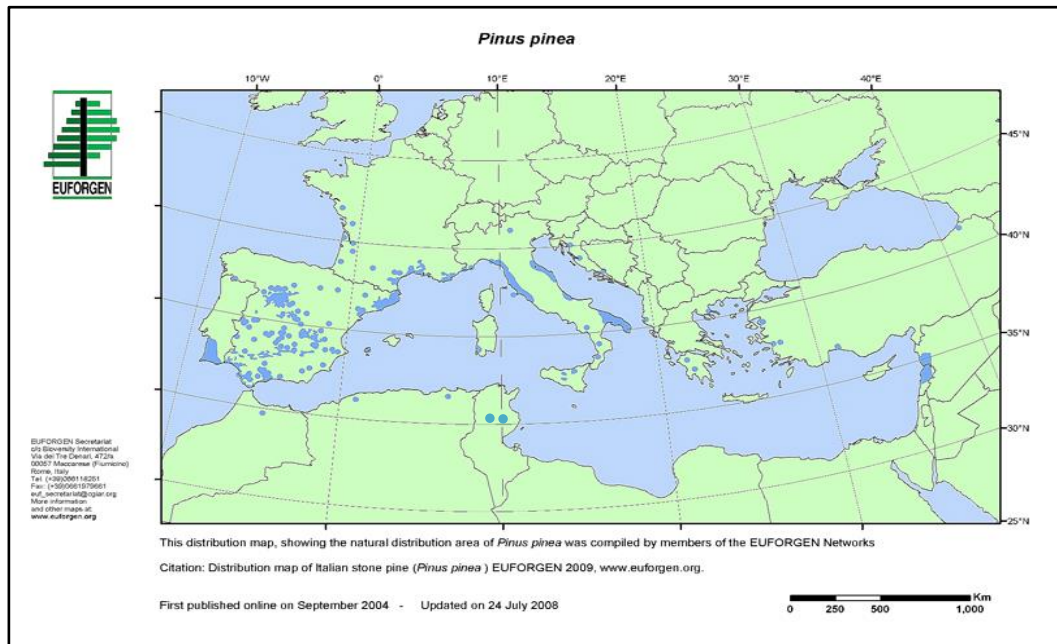


Figure 1. Aire de répartition géographique du pin pignon dans le monde

(Fady et al., 2004 ; Euforgen, 2009).

Dans les études palynologiques et les sites archéologiques de l'Holocène, le pin pignon a été trouvé dans toute son aire actuelle, allant du Portugal à la Turquie et au Liban (Feinbrun, 1959 ; Thirgood, 1981 ; Ramil et Aira, 1994 ; Franco- Mu'gica et al., 2005 ; Garcia Amorena et al., 2007 ; Rovira et Chabal, 2008 ; Henry et al., 2010 ; Rubiales et al., 2010).

Au cours des quatre derniers siècles, les colons européens ont introduit le pin pignon dans d'autres régions, comme l'Australie, l'Argentine, le Chili, la Californie et l'Afrique du Sud, où il s'est naturalisé et est même considéré dans certains cas comme une espèce envahissante (Richardson et Higgins, 1998).

2.1. Répartition en Algérie

En Algérie, le pin pignon se trouve sous forme de reboisement dans différentes régions (littorales, sub-littorales,). Ces plantations ont été réalisées entre 1930 et 1974. Les principales plantations se trouvent à Constantine (2278 ha), Bouira (456 ha), Mostaganem (407 ha), Médéa (276 ha) et Annaba (89 ha) (IFN, 2017).

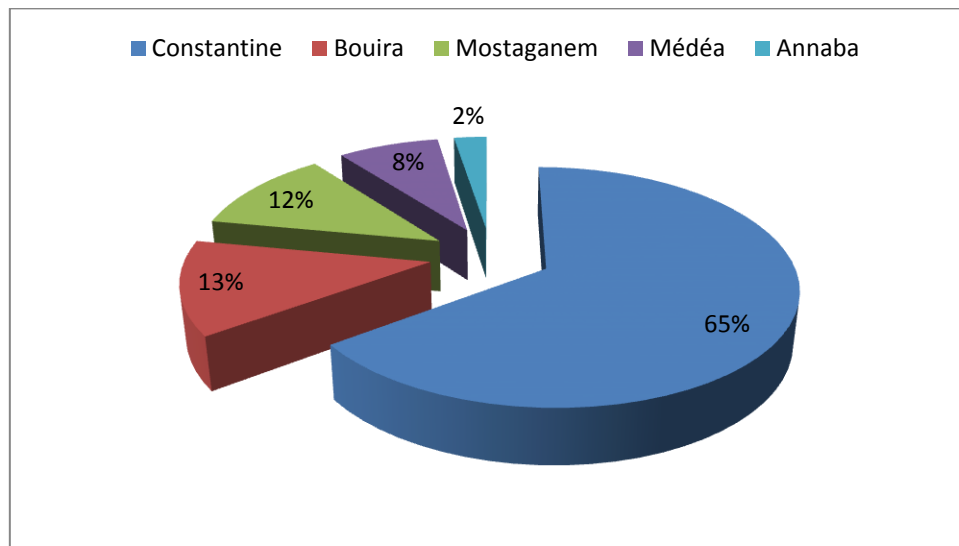


Figure 2. Répartition des principales plantations du pin pignon en Algérie

Les peuplements du pin pignon les plus importants dans l'Ouest algérien se localisent dans la région de Mostaganem. Il pousse bien sur les hauteurs de Tiaret où il se trouve en mélange avec le pin d'Alep (forêt des pins), comme il constitue des magnifiques pineraies à Chlef (Abou El Hassen, Beni derdjine, Sendjas). Il existe aussi à Tlemcen (forêt de Hafir) et en bordures des routes à Mascara. Ces plantations ont révélé que les potentialités d'adaptation et d'acclimatation de cette essence et la capacité de l'espèce de coloniser des milieux aussi difficiles.



Figure 3. Pin pignon à Tiaret (droite) et Chlef (gauche) (Photo Boulenuar, 2022)

3. Description botanique du pin pignon

3.1. Taxonomie et génétique

3.1.1. Taxonomie

Le genre *Pinus* est le plus grand et le plus important groupe de conifères avec plus de 100 espèces, se répandant principalement sur l'hémisphère nord. Les forêts de pins sont des types de forêts très importants dans les zones climatiques boréales et tempérées, pour des raisons tant économiques qu'écologiques. En raison de leur importance commerciale, plusieurs espèces de pins sont cultivées dans les plantations forestières pour le bois d'œuvre et le bois à pâte, souvent en dehors de leur aire de répartition naturelle (Mirov, 1967 ; Farjon ,2005).

Dans le sous-genre *Pinus* (pins durs), la section *Pinea* comprend, outre *Pinus pinea*, les autres véritables pins méditerranéens (*P. pinaster*, *P. halepensis*, *P. brutia*, *P. eldarica* et *P. canariensis*) et quelques espèces asiatiques apparentées. Au sein de ce groupe, le pin pignon ne s'hybride pas et diffère fortement de ses congénères par son écologie et sa stratégie de reproduction dans les écosystèmes méditerranéens. Ses grandes graines sans ailes sont dispersées par les animaux, tandis que les autres pins méditerranéens ont de petites graines à longues ailes, dispersées par le vent. Ils sont également adaptés aux feux de forêt récurrents. Gaussen et al (1982) et Ozenda (1991), ont établi la position taxonomique du pin parasol comme suit :

Tableau 1. Position taxonomique du pin pignon.

Embranchement	Spermaphytes
Sous Embranchement	Gymnospermes
Classe	Coniféropsidae
Ordre	Coniférales
Famille	Pinaceae
Genre	<i>Pinus</i>
Espèce	<i>pinea</i>

3.1.2. Variation génétique du pin pignon

Bien que le pin pignon possède des populations dispersées dans toute son aire de répartition méditerranéenne, l'espèce semble dépourvue non seulement de toute structure démographique ou phylogéographique, mais aussi de toute variation génétique neutre au sein de ses populations ou entre elles. Son niveau extrêmement faible de diversité au niveau des

marqueurs chloroplastiques et nucléaires est vraiment exceptionnel parmi les arbres abondants et répandus et est attribué à un goulot d'étranglement démographique sévère et prolongé bien avant sa dispersion quaternaire sur son aire de distribution actuelle. Cependant, de nouvelles données de marqueurs moléculaires indiquent deux pools génétiques différenciés aux limites les plus occidentales et les plus orientales du bassin méditerranéen et un scénario démographique plus complexe (Fallour et al., 1997 ; Vendramin et al., 2008).

Quelques travaux publiés à ce jour concernant la variation des caractères quantitatifs coïncident en ne rapportant que des différences mineures ou non-significatives entre les populations, bien qu'il y ait eu des différences phénotypiques claires entre les clones ou les familles étudiées dans des vergers greffés ou in-vitro (Court Picon et al., 2004 ; Gordo et al., 2007 ; Cuesta et al., 2008 ; Mutke et al., 2010).

Des tests multi-stationnels de comparaison de provenances ont été installés sous l'égide de la FAO, conjointement dans plusieurs pays (75 provenances) afin d'évaluer la structure de la diversité génétique des caractères adaptatifs les plus important, la croissance et surtout la fructification, des différentes provenances testées. La répartition par pays du nombre de provenances comparées est représentée dans le tableau suivant (tableau 2).

Tableau 2. Répartition par pays du nombre de provenances comparées.

Pays	N° de provenances	Pays	N° de provenances
Italie	13	Turquie	12
Grèce	12	Maroc	9
Espagne	7	Portugal	7
France	5	Tunisie	5
Liban	4	Chypre	1

Tous ces essais n'ont pas révélé de différences significatives entre les provenances testées en terme d'adaptation, par contre il existe une variabilité hautement significative en terme de croissance (Mutke et al., 2012 ; Gonçalves et Pommerening, 2012 ; Sbay et Hajib, 2016).

3.2. Morphologie du pin pignon

3.2.1. Description générale

Le pin pignon est un arbre résineux à feuilles persistantes qui peut dépasser 20 m de hauteur à l'âge de 40 à 60 ans, atteignant 35 m chez certains arbres monumentaux dont le diamètre du

tronc peut atteindre 2 m (Earle, 2009). Néanmoins, dans son habitat naturel aux ressources limitées, la croissance en hauteur est assez lente, les arbres dominants ayant plutôt tendance à faire environ 10 à 20 m ou même moins à leur sommet, avec des diamètres de 30 à 50 cm à la fin de la rotation sylvicole (80 à 120 ans). Sa longévité peut atteindre 250 ans, rarement plus, mais certains auteurs comme Gonzales Vasquez (1947) et Feinbrun (1959) ont noté qu'elle dépasse 400 ans dans certaines régions.

Les aiguilles adultes sont de 10 à 20 cm de long, flexibles, et poussent en fascicules (pousses naines) regroupant 2 (occasionnellement 3) aiguilles avec une gaine d'écailles basales persistantes. Les nouvelles aiguilles n'apparaissent que sur les nouvelles pousses allongées et persistent dans 2 à 3 ans.

L'écorce du tronc est épaisse, brun rouge, et profondément fissurée en larges plaques verticales, ce qui confère à l'arbre une grande résistance au feu de terre. Comme pour le pin sylvestre, l'écorce des branches de la couronne supérieure est plus mince, floconneuse et brune orangée. Ces deux types d'écorce diffèrent également entre le greffon et le porte-greffe au niveau de leur union.

Le système racinaire du pin pignon est puissant ; sa racine pivotante primaire avorte tôt, mais forme de nombreuses racines secondaires qui peuvent atteindre, dans les sols sablonneux secs, jusqu'à 37 m du tronc, dépassant largement la projection de la couronne, envoyant des racines tertiaires verticales qui explorent les couches plus profondes du sol.

Les pins sont des symbiotes obligatoires avec les champignons mycorhiziens et bénéficient de la plus grande capacité d'absorption d'eau et de nutriments minéraux du mycélium. Le pin pignon s'associe avec des espèces des genres *Rhizopogon*, *Suillus*, ou *Pisolithus*, et autres.

Le partenaire mycorhizien le plus intéressant est le lactaire safrané, *Lactarius deliciosus*, un champignon comestible d'un prix élevé qui peut être inoculé sur *Pinus pinea* dans les pépinières, faisant de sa cueillette dans les plantations de pins un revenu complémentaire intéressant (Loewe et al., 1997).

3.2.2. Architecture de l'arbre

Le pin pignon est un gymnosperme, bien que dans les environnements difficiles, les gymnospermes puissent dominer le paysage ou des biomes entiers. Elles se caractérisent souvent par un modèle architectural de couronne fixe. L'architecture de la couronne des pins est basée sur un modèle de ramification régulier formant des verticilles à l'extrémité apicale

de la pousse annuelle et suit le modèle de Rauh défini par Halle et Oldeman (1970). Ce modèle d'architecture des arbres est déterminé par un tronc orthotrope monopode qui croît de manière rythmique, en développant des verticilles de branches. Les branches principales sont morphogénétiquement identiques au tronc, et les structures de reproduction sont latérales sans effet sur la topologie du système de pousses (Lanner, 1976 ; Klaus, 1989 ; Mutke et al., 2003).

Comme la plupart des pins des climats tempérés, le pin pignon est normalement uninodal ; chaque apex allonge son bourgeon terminal en une seule poussée au printemps (avril-juin) en un rameau annuel qui forme à son extrémité un nouveau verticille de bourgeons de branches latérales (et de cônes femelles) et le nouveau bourgeon terminal. Cela implique que la croissance est prédéterminée l'année précédente dans les bourgeons qui sont fixés à la fin du printemps et qui se reposent pendant près d'un an (Ruiz de la Torre, 1979 ; Lanner, 1989 ; Mutke et al., 2005).

3.2.3. Structures reproductives

Les pins sont monoïques et anémophiles, portant des strobiles mâles (staminés) et femelles (ovulées) au printemps sur les pousses de l'année en cours, bien que dans des axes différents. Chez le pin pignon, les strobiles femelles ne sont portés qu'à l'extrémité de pousses vigoureuses et orthotropes. Dans une analyse architecturale des pins pignon, les strobiles femelles ont été trouvés seulement sur les nouvelles pousses avec des diamètres d'environ 5 à 16 mm, bien que même dans les pousses les plus vigoureuses, leur probabilité était inférieure à 40 % (Mutke et al., 2005).

Les strobiles mâles, au contraire, sont produits sur les pousses minces des branches latérales ou dominées (diamètres 2 à 5 mm, l'extrémité inférieure de la distribution générale du diamètre des pousses), dont beaucoup se trouvent dans la couronne inférieure. Il y a beaucoup de petits cônes de pollen jaunâtres groupés de manière compacte à la base de chaque pousse, occupant souvent une plus grande proportion de sa longueur que le fascicule de l'aiguille. Les strobiles femelles sont jaune vert, isolées ou parfois 2 ou plus ensemble à l'apex d'un rameau. Chaque strobile femelle possède un pédoncule séparé avec des bractées écailleuses, qui servent à l'envelopper avant son expansion ; sa forme est ovale, et sa longueur d'environ 1 cm. Après la pollinisation par le vent au printemps, les écailles du strobile augmentent en épaisseur et sont fermement pressées les unes contre les autres avant la lignification.

Au cours de la première année, le cône ne grandit que très peu ; la deuxième année, il devient globulaire (de la taille d'une noix). Il n'atteint sa taille définitive (8 à 15 cm de long, 5 à 10 cm de large) qu'à l'été de la troisième année, lorsque la fécondation et l'embryogenèse ont eu lieu, bien que les graines qu'il contient ne mûrissent pas avant la fin de l'automne (Francini, 1958). L'ensemble du processus, de la pollinisation à l'ouverture du cône, prend 3 ans, soit un de plus que chez la plupart des autres pins, et les cônes en cours de maturation se trouvent un verticille plus profond dans la couronne, sous la cohorte d'aiguilles de l'année précédente.

Avec un nombre moyen de 3 branches par verticille, cette année supplémentaire signifie une multiplication par 5 de la biomasse des aiguilles au-dessus de la pousse porteuse du cône pour le maintien du cône, en plus d'un meilleur support mécanique des cônes lourds sur une pousse plus épaisse. En revanche, d'autres espèces de pins dispersant le vent et dont les cônes mûrissent en deux ans les produisent souvent sur des branches latérales, dispersant les petites graines à longues ailes lorsque les cônes mûrs et ouverts sont déplacés par le vent, de la même manière que le pollen de pin aérien libéré par les strobiles mâles sur les pousses latérales élancées (Mutke et al., 2012).



Figure 4. Pin pignon, cônes mâles (droite) et cône femelle (gauche).

4. Biologie du pin pignon

4.1. Maturité reproductive

Les jeunes pins pignon subissent normalement le changement de phase reproductive vers la maturité sexuelle plusieurs années après le changement de phase végétative. Bien que chez les pousses mères vigoureuses, les premiers cônelets peuvent apparaître dès l'âge de 5 à 8 ans,

l'effort de reproduction sera limité pendant des années. Pendant cette période, la plupart des bourgeons latéraux de chaque verticille sont végétatifs, ce qui donne quatre à huit branches par verticille ; chez les arbres à maturité reproductive, un verticille porte normalement 2 à 4 branches et le reste des primordiaux de bourgeons latéraux se convertissent en cônelets femelles (Mutke et al., 2005). À l'âge de 10 à 15 ans, la maturité mâle est atteinte, et chez les jeunes arbres en pleine croissance, la présence de cônes femelles avec des graines normalement développées est courante à l'âge de 15-20 ans (Tapias et al., 2001). La phase végétative adulte, mais immature sur le plan reproductif représente la croissance en hauteur et en diamètre la plus vigoureuse de l'arbre, avec un taux de ramification plus élevé et l'absence de coûts de reproduction.

4.2. Développement reproductif

Les primordiaux de cônes sont préformés à l'intérieur du bourgeon de pousse un an avant l'émergence et la pollinisation. Les strobiles femelles apparaissent pendant la poussée printanière du bourgeon lorsque la pousse atteint environ la moitié de sa longueur finale. Sur les sommets les plus élevés des pousses, les strobiles pointent vers l'air comme de petits paratonnerres à la recherche de grains de pollen aériens chargés d'électricité statique, étant réceptifs lorsque l'élongation de la pousse est presque terminée, mais avant que les nouvelles aiguilles ne se referment dans l'apex de la pousse. Bien que les cônelets mâles et femelles apparaissent à des moments différents sur les pousses en développement, la floraison est synchrone ; il n'existe donc aucun obstacle phénologique à l'autopollinisation.

La pollinisation a lieu plusieurs semaines plus tard que chez les espèces sympatriques *P. pinaster* et *P. halepensis*, au début du mois d'avril dans les régions chaudes et à la fin du mois de mai ou même en juin dans les provenances plus froides. Les dates de floraison peuvent varier de plusieurs semaines d'une année à l'autre, en fonction des unités de chaleur accumulées ; chaque augmentation de 1°C de la température ambiante fait avancer la floraison d'environ une semaine. Le cône et la graine se développent lentement pendant deux ans ; au troisième printemps, le tube pollinique se forme, la fécondation a lieu et la graine mûrit jusqu'à l'automne (Francini, 1958 ; Abellanas et Pardos, 1989 ; Mutke et al., 2003).

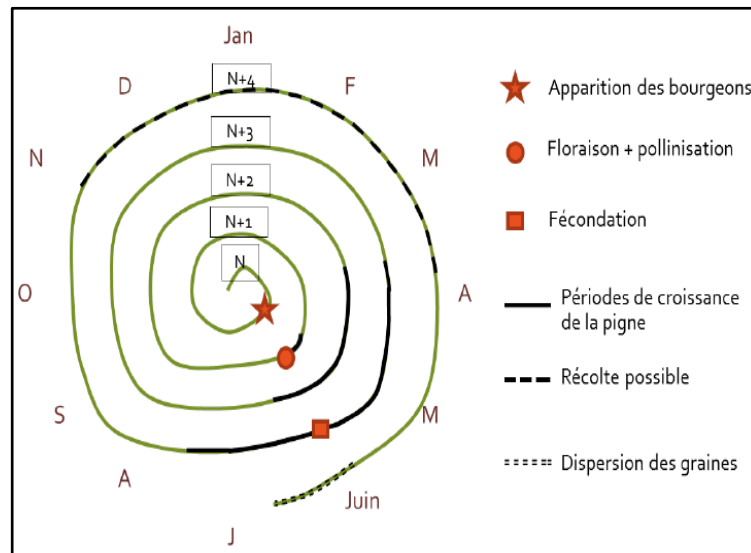


Figure 5. Le cycle reproductif des cônes de pin pignon (Mutke et al., 2003).

Le développement reproductif des cônes de pin pignon dure près de 4 ans depuis la formation des primordiaux dans le bourgeon (étoile, année 0), la pollinisation des cônelets (cercle, année 1), la fécondation des ovules (carré, année 3) jusqu'à la chute des graines (lignes discontinues) si les cônes ne sont pas récoltés l'hiver précédent (double lignes discontinue). Les périodes de croissance des cônes sont marquées par des lignes noires continues. La phénologie printanière se réfère aux régions intérieures plus froides ; dans les zones côtières, plus chaudes, elle est environ 2 mois plus tôt (Abellanas et Pardos, 1989 ; Mutke et al., 2003).

Les cônes mûrs sont lourds, de forme ovoïde large, de 8 à 15 cm de long, pesant 250 à 350 g, parfois jusqu'à 500 g. Chaque cône contient environ 80 à 120 grosses graines, presque sans ailes, 2 par écaille de cône. Ces pignons mesurent 1 à 2 cm de long, pèsent environ 0,6 g, sont brun pâle avec un enrobage poudreux qui devient brun cannelle en automne et noir lorsque les graines sont mûres pour la récolte. S'ils ne sont pas ramassés par les rongeurs ou récoltés par l'homme en automne ou en hiver, les cônes s'ouvriront au printemps de la quatrième année, et les graines seront disséminées ou recueillies durant l'été et pendant l'automne (Mutke et al., 2003).

4.3. Dispersion des graines dans les habitats naturels

Chez le pin pignon, l'aile vestigiale des graines est inefficace pour la dispersion par le vent, et les graines sont chassées et dispersées accidentellement par des rongeurs ou des oiseaux. Cette stratégie de dispersion secondaire par des prédateurs de graines est partagée avec d'autres pins à grandes graines et a probablement évolué indépendamment dans différentes lignées phylogénétiques, bien qu'il s'agisse d'une stratégie coûteuse pour les organismes par

rapport à la dispersion par le vent de petites graines à longues ailes, habituelle chez la plupart des espèces de pins (Foster, 1986 ; Tomback et Linhart, 1990).

Le pignon du pin est riche en nutriments et en énergie avec 50 % de lipides et une teneur élevée en protéines de 30 à 35 %. L'agrégation de nombreuses graines dans de grands cônes qui ont besoin de trois ans pour mûrir les rend susceptibles d'être complètement perdues par divers risques abiotiques ou biotiques. En guise de défense, le pin pignon alloue 96 % de la masse du cône à des structures ligneuses (écailles du cône et enveloppes épaisses des graines) pour protéger les graines ou comme adaptation à l'action au feu (Johnson et al., 2003 ; Siepielski et Benkman, 2008).



Figure 6. Pin pignon, graines (droite) et pignons (gauche).

4.4. Germination

Le Pin pignon est classé selon Vabre-Durrieu (1956), parmi les espèces à graines qui n'ont pas de dormance (Agrimi et Ciancio, 1993). Le pouvoir germinatif des graines varie entre 70 et 90 % et leur longévité est de 4 à 6 mois en moyenne et peut se prolonger plus. Elles peuvent être conservées de 3 à 6 ans au froid (2 à 4 °C) sec (6 à 7 %). La levée s'effectue 1 à 5 semaines après l'ensemencement effectué en septembre ou au printemps.

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).

La lumière est également considérée comme un facteur influençant indirectement la germination et la performance des semis en contrôlant les fluctuations de la température, changeant la disponibilité d'eau et par conséquent l'absorption des nutriments (Vásquez-Yanes et Orosco-Segovia, 1993; Bullock, 2000).

La stratification des graines facilite la germination, elle a également l'avantage de conserver la faculté germinative des graines tout en les protégeant du gel et en évitant leur dessèchement. L'absorption d'eau par des graines stratifiées à 4°C provoque l'activation des enzymes qui accélèrent la germination. La stratification à basse température provoque une légère activation de la synthèse protéique. La durée de stratification des graines est très différente d'une espèce de pin à l'autre et au sein d'une même espèce. Pour le pin pignon, les semis sont effectués au printemps, après une stratification des graines tout l'hiver (Muscolo et al, 2007 ; Khaldi, 2009).

4.5. Croissance

Le caractère monocyclique de la croissance de *Pinus 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, 1981).

Selon Mutke et al (2003), 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. La 2^{ème} vague de croissance est sous le contrôle des conditions climatiques l'aient permis, notamment la pluviométrie estivale. Poupon (1970), a relevé qu'en Tunisie une durée de croissance allant de 90 à 170 jours. L'espèce présente un arrêt de croissance quand le déficit hydrique est trop fort (en juillet).

En effet les études de Castellani (1979), en Italie 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. A l'inverse, il y a deux maxima de croissance : en mai-juin et, surtout, en octobre ; ces époques sont également celles des maxima de précipitations.

5. Écologie du pin pignon

Plusieurs études approfondies sur l'écologie du pin pignon caractérisent ses habitats centraux et marginaux à l'état sauvage (Romero, 1886 ; Agrimi et Ciancio, 1993 ; Gandullo et Sanchez Palomares, 1994 ; Blanco et al., 1997 ; Prada et al., 1997 ; Montero et al., 2004 ; Montero et al., 2008). Néanmoins, il existe peu d'études sur les limites agronomiques et les gammes optimales des paramètres autoécologiques de cette espèce d'arbre, en raison de son manque de variétés et de sa production à grande échelle en dehors des forêts.

Il existe des exemples d'autres espèces de pins endémiques étroites dont l'aire de répartition actuelle est limitée, loin de leur optimum autochtone, comme *P. torreyana*. Dans son habitat naturel côtier, sujet à la sécheresse, le pin *torreyana* est un arbre à couronne ouverte battu par le vent et ne mesurant que 5 à 15 m de hauteur, mais il produit des arbres droits pouvant atteindre 45 m de hauteur dans les plantations forestières d'Australie ou de Nouvelle-Zélande. Un autre exemple est l'emblématique *P. radiata*, avec 15 à 30 m dans son aire de répartition naturelle, mais jusqu'à 65 m en Nouvelle-Zélande. La hauteur dominante des peuplements naturels de *P. pinea* atteint 25 m à 150 ans dans les meilleurs sites (Calama et al., 2003), mais au Chili, certains arbres ont atteint cette hauteur à 40-50 ans, 28 m à 80 ans, et semblent encore augmenter (Loewe et al., 1997).

5.1. Climat

Le pin pignon est une espèce thermophile, relativement xérophile, héliophile par excellence et exige une pleine lumière. Sa diffusion est liée au climat chaud et lumineux des côtes méditerranéennes. Les facteurs limitant la répartition du pin pignon, sont essentiellement de nature thermique, tandis que les stations les plus favorables sont caractérisées par des conditions écologiques intermédiaires (Ciancio et al., 1990).

L'espèce peut occuper des bioclimats variés allant du semi-aride côtier jusqu'à l'humide de la variante chaude et tempérée, de 0 à 1400m d'altitude avec de précipitations comprises entre 400 et 1000mm. La croissance est moindre dans les bioclimats semi-arides et dans les types froids et très humides (Montero et al., 2004).

5.1.1. Températures

Selon Giordano (1990), la température constitue un facteur déterminant dans la distribution du pin pignon. 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 à l'état physiologique des arbres. Les basses températures combinées à l'humidité seraient néfastes sur les houppiers, et elles peuvent engendrer le rougissement des pousses ainsi le dessèchement d'une grande surface de la pinède.

Le pin pignon se rencontre dans les limites thermiques correspondant aux valeurs température moyenne annuelle de 10 à 18°C ; Température moyenne minima (m) du mois le plus froids (-2°C à 7°C) et Température moyenne maxima (M) du mois le plus chaud (27°C à 32°C) (Mutke et al., 2003). Il arrive à supporter les grands froids exceptionnels (-20°C) en Espagne et (-10°C à -15°C) en France (Mutke et al., 2005).

L'une des caractéristiques du pin parasol est sa résistance à la sécheresse. Il peut supporter une période de sécheresse de 2 à 6 mois (au sens de Gaussen). L'émission d'un très long pivot aux premiers stades de son développement, lui permet d'atteindre rapidement la nappe phréatique (Agrimi et Ciancio, 1993).

5.1.2. Précipitations

La pluviométrie annuelle moyenne de sa population varie d'environ 400 à 800 mm ou plus (1500 mm), avec 15 à 125 mm en été (sécheresse estivale de 4 mois), bien qu'avec une répartition souvent très irrégulière entre les saisons et les années. 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 (Mutke et al., 2005). La structure ouverte de la couronne ne tolère pas les fortes chutes de neige humide ; ainsi, les limites altitudinales et latitudinales de l'habitat de l'espèce sont marquées par la récurrence des chutes de neige plutôt que par la température (Alexandrian, 1982).

5.2. Préférences édaphiques

Le pin pignon peut être le pionnier d'habitats pauvres tels que les dunes mobiles ou le calcaire grâce à son système racinaire robuste. La plupart des peuplements de pin pignon poussent sur des types de sol naissants, tels que les arénosols, les régosols et les lithosols, ou sur des cambisols ou des luvisols matures sur les meilleurs sites. L'espèce est assez tolérante à des pH légèrement acides à basiques (pH= 5 à 9), bien que les sols neutres soient préférés. Le calcaire actif est fréquemment à 0 % dans les sols siliceux, mais jusqu'à 16 %, aucun effet négatif sur la croissance n'est observé dans les provenances espagnoles (Mutke et al., 2012). Il existe des

forêts spontanées de pin pignon sur des sols calcaires avec du calcaire actif à environ 35 à 40 %, et même en présence de gypse, bien que la qualité du site pour l'espèce diminue dans ces conditions de sol (Gordo, 2004 ; Calama et al., 2008).

La structure du sol est importante pour le pin pignon, car les racines préfèrent les sols bien drainés à texture meuble, comme le sable, le limon sableux ou le gravier (avec une capacité de rétention d'eau d'au moins 60 mm). Dans les sols argileux ou limoneux compacts (avec moins de 40 % de sable et plus de 40 % de limon ou plus de 30 % d'argile), le développement des racines est limité, surtout dans la première phase de l'établissement des semis, et peut retarder la floraison pendant de nombreuses années, fixant l'ontogenèse de la plante dans un état juvénile stationnaire. Cependant, le pin pignon peut survivre et prospérer dans des sols lourds tant qu'ils ne sont pas gorgés d'eau et qu'il n'y a pas de compétition interspécifique excessive (Agrimi et Ciancio, 1993 ; Gandullo et Sanchez Palomares, 1994).

6. Utilisations du pin pignon

Le pin pignon est une espèce à usages multiples, il est utilisé généralement pour 03 raisons :

6.1. Reboisement de protection

Il est utilisé pour l'amélioration des formations dégradées du maquis permettant le développement d'une nouvelle formation végétale et l'enrichissement de paysage, favorisant ainsi le développement d'activités récréatives et touristiques (Agrimi et Ciancio, 1993).

Il joue aussi un rôle très important dans la lutte contre l'érosion dans les régions montagneuses, dans la fixation des dunes littorales grâce à son système racinaire généralement très bien développé et la protection des terrains agricoles, les infrastructures routières et les agglomérations urbaines, contre les vents marins et le sable (Sbay, 2016).

6.2. Production du bois

Selon Sbay (2016), Les reboisements de production ligneuse doivent se limiter aux zones bioclimatiques humides et subhumides sur terrains fertiles. Cette production est comparable à celle des autres pins plus connues. Les travaux d'Abdallah 1999 (in Khouja, 2000), ont révélé des productions intéressantes de l'ordre de 7,4 m³/ha/an et de 8 m³/ha/an respectivement sous bioclimat humide et subhumide concurrençant nettement celles obtenues par d'autres espèces reconnues très productives telles que le pin radiata ou le pin maritime.

Son bois ressemble beaucoup au bois de *Pinus pinaster* mais avec des canaux résinifères plus gros. 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 (Mercurio, 1989 ; Djaziri, 1971) et peut atteindre 7 à 8 m³/ha.an dans des conditions écologiques très favorable. Il fournit un bois de qualité souvent supérieure à celle du pin sylvestre et du pin maritime. Il 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, et dans les constructions navales (Ciancio, 1968 ; Djaziri, 1971).

6.3. Production de fruits

6.3.1. Forêts et zones boisées de pin pignon.

De nombreux travaux de recherche et développement ont été menés sur l'écologie et la sylviculture des forêts de pin pignon méditerranéen et, en particulier, sur ses cônes en tant que produit forestier non-ligneux (Castellani, 1989 ; Agrimi et Ciancio, 1993 ; Calama, 2003 ; Montero et al., 2004 ; Calama et Montero, 2007 ; Calama et al., 2008 ; Montero et al., 2008 ; Ovando et al., 2010 ; Adili, 2012 ; Loewe et al., 2019). Les forêts de pin pignon méditerranéen peuvent être pures ou mélangées avec d'autres pins méditerranéens (*P. pinaster* ou *P. halepensis*), des chênes (*Quercus ilex*, *Q. suber*, ou *Q. faginea*), ou des genévriers (*Juniperus communis*, *J. oxycedrus*, *J. thurifera*, ou *J. phoenicea*) sans sous-bois ou accompagnés de taillis de ces chênes et d'autres arbres et arbustes méditerranéens. En général, les peuplements purs sont des forêts gérées avec une structure régulière dérivée du semis, de la plantation ou de la régénération naturelle après une coupe à blanc ou une coupe progressive.

Le pin pignon forme une strate dominante d'arbres équiennes, soit avec une couche de canopée presque fermée, atteignant des densités finales de 200-250 arbres/ha à 100 ans (s'il est géré pour la production de bois), soit plus clairsemé pour optimiser le développement de la couronne, favorisant ainsi la production de cônes. Dans le dernier cas, l'éclaircissement est effectué tôt et de manière intensive pour atteindre une densité finale de 75-125 arbres/ha à des âges de 50-60 ans (Montero et al., 2008). Il est fort probable qu'en l'absence de gestion, la structure naturelle des peuplements de pin pignon aurait tendance à être irrégulière et à former des forêts ouvertes avec un couvert inférieur à 40 %, voire 20 %. Les jeunes arbres seraient regroupés en petits groupes d'âge égaux poussant sous l'influence de l'ombre du houppier des arbres plus âgés (Mutke et al., 2012). L'enrichissement par d'autres espèces serait facilité par

l'évolution du sol sous l'action du pin. Cependant, dans les habitats authentiques du pin pignon dans les plaines sableuses et les dunes, l'eau plutôt que la lumière est le principal facteur limitant de la croissance. Ainsi, la compétition se fait entre les racines, et non entre les couronnes, et la surface occupée par le système racinaire d'un arbre dépasse de 10 à 50 fois la projection de sa couronne, ce qui explique la faible fermeture de la canopée (Montero et al., 2004). Le pin pignon fait partie des écosystèmes méditerranéens non seulement en tant qu'espèce dominante de la végétation azonale psammophile des dunes côtières ou intérieures, mais aussi souvent en tant qu'espèce d'accompagnement dans les forêts méditerranéennes mixtes dominées par le chêne vert ou le chêne-liège ou dans les zones arbustives.

6.3.2. La production de cônes

Dans les forêts dominées par le pin pignon, les cônes sont maintenant le produit le plus important, fournissant un revenu plus élevé aux propriétaires forestiers que le bois et les autres produits (Ovando et al., 2010). Le pin pignon est parfois considéré comme un arbre fruitier pour sa rentabilité de ses fruits. Les principaux pays producteurs de pignons sont le Portugal, en première place, suivi de l'Espagne, de la Turquie, du Liban et de l'Italie. Dans tous ces pays, la production repose principalement sur les peuplements forestiers d'origine naturelle ou provenant de reboisements de protection effectués au cours des 150 dernières années (Mutke et al., 2012). Néanmoins, cette production forestière est limitée par la qualité du site et subordonnée aux fonctions écologiques et sociales de ces forêts, principalement la protection des sols et des bassins-versants, la biodiversité, la fonction paysagère et récréative.

La production moyenne de cônes varie fortement dans le temps et dans l'espace. Elle dépend de différents facteurs à savoir : la dimension et la maturité de la plantation, la station, le traitement, la densité du peuplement, les élagages, les modalités de régénération, l'état sanitaire, fertilité et aux conditions climatiques au cours du développement des cônes (Mutke et al., 2012). Par exemple, dans la principale région productrice de cônes de l'Espagne intérieure, le bassin moyen du Douro appelé Meseta Norte (le plateau nord-castillan), le rendement annuel moyen en cônes était d'environ 200 kg/ha entre 1960 et 2000, mais variait de moins de 20 kg/ha à plus de 900 kg/ha d'une année à l'autre (Gordo, 2004 ; Mutke et al., 2005). Les peuplements de plus de 30 et 40 ans dépassent la moyenne et doublent à 100-140 ans, sans qu'il y ait d'âge maximal clair en l'absence de densité excessive du peuplement ou de problèmes de santé forestière qui entraîneraient la sénescence des couronnes (Cañadas, 2000 ; Calama et Montero, 2007 ; Montero et al., 2008). Les moyens locaux sont également très

variables, en fonction de la qualité du site et surtout de la disponibilité en eau du sol (par exemple, les forêts de la région du Douro ont un rendement de 60 à 600 kg/ha). Les rendements moyens sont d'environ 100 kg/ha en Espagne ou en Turquie, 200 kg/ha au Liban, 300 kg/ha en Italie et 700 kg/ha au Portugal (plus de 1 000 kg/ha dans le district de Setubal, au sud de Lisbonne, où un climat tempéré et humide permet une croissance optimale et stable) (Castellani, 1989 ; Oliveira, 1995 ; Coelho, 1997 ; Sabra et Walter, 2001 ; Nanos et al., 2003 ; Gordo, 2004 ; Calama et Montero, 2007 ; Calama et al., 2008). La taille des pins et des graines peut varier considérablement d'un site, d'une région et d'une année à l'autre, mais la production relative de graines (par poids de cône) est un rapport assez stable : 1 000 kg de cônes contiennent environ 160 à 200 kg de graines non décortiqués et 40 kg de graines décortiquées (Gordo et al., 1999 ; Montero et al., 2004 ; Calama et Montero, 2007 ; Morales, 2009).

6.3.3. Marché des pignons de pin

La production mondiale annuelle de pignons méditerranéens est irrégulière en raison des régimes de maturation qui peuvent affecter plusieurs pays en même temps, mais elle varie autour de 30 000 tonnes (t) en coque ; 6 000-15 000 tonnes au Portugal (principalement dans le district de Setubal), 6 000-10 000 tonnes en Espagne (60 % en Andalousie occidentale, 30 % en Castille et 10 % en Catalogne) ; et 1 500-5 000 tonnes en Italie et en Turquie (Castaño et al., 2004 ; Barranco et Ortuño, 2004).

Cependant, les données de production sont souvent peu fiables pour diverses raisons (Barranco et Ortuño, 2004), notamment en raison de la manière traditionnelle dont la récolte est accomplie. La plupart des récoltes se font sous contrat avec un propriétaire forestier payé un prix à l'hectare préalablement convenu en fonction du rendement estimé. Dans certaines régions, les pignons sont récoltés principalement pour la consommation locale, les cônes étant considérés dans certains endroits comme une marchandise libre. En outre, le pillage des cônes est important. Par conséquent, les propriétaires forestiers ne connaissent souvent pas les rendements réels.

Le prix des pignons de pin méditerranéens en coque sur les marchés internationaux est d'environ 2 dollars par kg et de 20 à 30 dollars par kg pour les graines décortiquées, le prix de détail actuel étant d'environ 50 à 70 dollars par kg. L'offre de pignons de cette espèce et d'autres espèces dont les graines sont comestibles est limitée. Bien qu'il existe certains produits de substitution, comme les amandes, qui pourraient atténuer la demande, le prix est

assez inélastique, alors que le marché est très élastique en termes de quantité, absorbant autant de pignons que possible (Trueb, 1999 ; Sabra et Walter, 2001 ; Barranco et Ortuño, 2004 ; Sharashkin et Gold, 2004 ; Batlle, 2006 ; Fuentes, 2009 ; Jurado, 2009).

Plus de 20 espèces de pins produisent de grosses graines comestibles qui sont ou étaient utilisées comme aliment de base par les populations locales, bien que les pignons de quelques espèces, seulement, soient commercialisés sur les marchés internationaux (FAO, 1998). Ces espèces comprennent trois espèces asiatiques : *Pinus koraiensis*, *P. gerardiana*, et *P. sibirica*.

La Chine représente à elle seule environ 80 % des exportations internationales de pignons, principalement de *P. koraiensis*, commercialisés à un prix actuel d'environ 10 dollars par kg. Les autres espèces comprennent le pin d'Amérique, *Pinus edulis*, *P. monophylla*, et surtout *P. cembroides*, dont aucune ne produit des pignons aussi savoureux et riches en protéines que les véritables pignons méditerranéens issus de *Pinus pinea* (Trueb, 1999 ; Batlle, 2006).

Ces pignons avec un contenu protéinique de 35 %, égale les grains de soja (Mutke et al., 2012), sont très riches en acides gras dont les plus abondants sont insaturés (85 %), principalement l'acide linoléique (45 % à 48 %) et l'acide oléique (36 % à 40 %) qui est un acide gras mono-insaturé contribue à abaisser le niveau du mauvais cholestérol (LDL) sans affecter le bon cholestérol (HDL) et les triglycérides. Les pignons de pin sont également riches en minéraux essentiels, tels que le magnésium (3 600 à 4 300 mg/kg), le phosphore (970 mg/kg), le potassium (7 500 à 8 800 mg/kg), le fer (70 à 130 mg/kg) et le cuivre (27 à 39 mg/kg) (Loewe et al., 1997 ; Montero et al., 2004). L'huile extraite des pignons est très importante pour les systèmes nerveux et musculaires. C'est une huile qualifiée de diététique car elle possède une action coupe-faim grâce à l'acide pinolénique. Elle est aphrodisiaque et utilisée pour le traitement de certains ulcères de l'estomac (Calama et Montero, 2007).

La récolte mondiale de pignons n'est pas suffisante pour satisfaire la demande croissante. Au cours de la dernière décennie, des pays comme la Chine et le Pakistan sont devenus les principaux pays exportateurs de pignons provenant de différentes espèces. L'origine botanique des pignons importés n'est pas indiquée sur les étiquettes et il est donc difficile pour les consommateurs de s'y retrouver, malgré la diversité des prix et des qualités (Loewe et al., 2019). En revanche, au cours du siècle dernier, le pin pignon méditerranéen a connu une expansion de son aire de répartition ainsi qu'une forte augmentation des surfaces plantées dans ses pays d'origine. Dans le futur, les reboisements de terres agricoles pourraient produire plus de pignons que les forêts naturelles, bien qu'il y ait une incertitude en raison des effets du

changement climatique sur la limite des zones climatiques tempérées et xériques dans la région méditerranéenne (Mutke et al., 2006).

7. Gestion Sylvicole

7.1. Installation des semis et élevage des plants

La première phase de survie ou de croissance des semis appelée établissement ou installation. Harper (1977), Silvestown et Lovett-Doust (1993) et Clark et al. (1999) montrent que la phase d'établissement est également considérée comme une étape cruciale de la vie des plantes, en raison des taux de mortalité couramment élevés et son potentiel de modifier et fixer les tendances spatiales et temporelles de recrutement. L'installation est sous l'effet de différents facteurs environnementaux extérieurs, bien que les plus essentiels soient la combinaison de la température, l'humidité et la lumière (Mayer et Poljakoff-Mayber, 1989).

Les graines sont semées en automne (semis direct). En pépinière, elles sont semées au printemps, en raison de la rapidité de la croissance, Après trempage des graines 24 à 48 heures dans l'eau froide de (4 à 5 °C), les graines sont semées dans des conteneurs contenant un mélange de terreau et de sable, à raison de 2 à 3 graines par conteneur, en les recouvrant de terre d'une épaisseur identique à celle de la graine. Il lui faut simplement de l'eau régulièrement et une température douce. Certains pépiniéristes arrosent les graines avec des fongicides pour contrôler la fonte des semis (Clark et al., 1999).

Les conteneurs sont rangés en blocs, sur des châssis à 15cm de ce dernier pour favoriser l'autocernage, stimuler l'émission de racines secondaires et éviter la formation d'un chignon à la place du pivot. La levée a lieu environ 15 jours après les semis. Les plants peuvent séjourner en pépinière de 6 mois à 2 ans maximum, toutefois la plantation de jeunes plants (6 à 7 mois) est conseillée (Silvestown et Lovett-Doust, 1993).

7.2. Plantation et préparation du sol

L'utilisation d'un matériel végétal adapté et des techniques favorisant l'installation et le développement rapide du système racinaire sont des conditions à remplir pour réussir un boisement du pin pignon. La période de plantation de l'espèce s'étale de février à avril (automne au printemps) selon les conditions pédoclimatiques de la station, en évitant les jours de gel. Le développement du pin pignon trouve les conditions les plus favorables sur sols profonds et meubles à texture sableuse. La préparation du sol conditionne étroitement la réussite des plantations. Le but est de faciliter l'accès rapide du pivot des jeunes plants aux

horizons d'encrage et d'alimentation en eau. Le défrichage n'est pas nécessaire sur les dunes littorales fixées. Dans les autres types de sol, il est conseillé généralement d'ouvrir au minimum des potets de (50*50*50cm). Il est préférable de pailler le pied après la plantation car les jeunes sujets craignent le gel (Harper, 1977).

7.3. Densité de plantation

Du point de vue de la protection contre l'érosion et les incendies, il est préférable d'avoir une densité élevée pour une fermeture rapide du couvert végétal, généralement plus de 2500 plants/ha (l'espacement entre les plants est de 2m x2m).

Pour la production du bois, la densité est un peu moins élevée que celle de la protection dont les espacements entre les plants varient de 2mx3m (1667 plants/ha) à 3m*3m (1111plants/ha).

Dans les autres cas, notamment dans l'optique d'une production de graines, la densité est faible (moins de 1000 plants/ha) pour avoir des pieds bien espacés, stables et avec des houppiers développés, et dont les dimensions seront en accord avec l'âge de la plantation et la station forestière (Mupangwa et Tagwira, 2005).

7.4. Entretien et fertilisation

Le désherbage et le sarclage sont nécessaires pendant les 2 ou 3 premières années afin d'éviter la concurrence des plantes adventices vis-à-vis de l'approvisionnement en eau. Selon Alexandrian (1982), l'arrosage et la fertilisation avec de fortes doses de compost d'ordures ménagères (1000 tonnes/ha) améliorent la croissance en hauteur jusqu'à 60% de gain et jusqu'à 25% avec l'engrais minéral N.P.K complet.

L'apport de grandes quantités de phosphore (superphosphate (18%) 450 à 600 kg/ha), de chlorure de potassium ((60%) 250 kg/ha) et de dolomie (800 kg/ha), a eu pour conséquence des récoltes moyennes de cônes par arbres 3 fois plus importante que les témoins (Calama et Montero, 2007).

Lorsque le pH du sol est acide, un chaulage de redressement est préconisé pour éviter que l'excès d'acidité ne soit préjudiciable à la plante. Le chaulage en dolomie ou en calcaire magnésien est un amendement minéral basique, calcique et/ou magnésien visant à améliorer la stabilité structurale, à lutter contre l'acidité excessive des sols et à améliorer le développement de l'activité microbienne. En plus, il entraîne un accroissement significatif de la quantité et la taille des cônes (Mupangwa et Tagwira, 2005).

7.5. Elagage

La densité élevée des peuplements favorise l'élagage naturel des branches basses. Pour accélérer ce phénomène un élagage artificiel se pratique généralement en automne, avant l'arrivée du froid et du gel. Il peut aussi être effectué en été après la pousse de printemps.

Il consiste à supprimer les branches les plus faibles, les brindilles séchées et les branches qui ont tendance à pousser vers le bas et/ou qui se croisent.

Le premier élagage pour le pin pignon est opéré lorsque les arbres ont un diamètre d'au moins 8 à 10 cm (environ 5 à 10 ans), il ne doit pas dépasser le tiers de la hauteur totale. Les élagages ultérieurs ne concerneront que le tiers de la hauteur totale. Dans tous les cas il est recommandé :

- D'intervenir pendant la période de repos végétatif, afin d'éviter le risque de dégâts dus aux attaques parasitaires.
- De colmater les plaies après la taille avec du mastic de cicatrisation pour limiter l'apparition de maladies et de champignons.
- D'effectuer une taille équilibrée pour donner une forme harmonieuse au peuplement (Mutke et al., 2012)

7.6. Eclaircies

Les éclaircies sont des incidences positives sur la croissance, le développement des plantations et la production de fruits, il s'agit généralement d'éclaircies par le bas, avec élimination des arbres dominés et faibles. Chez le pin pignon les éclaircies commencent à l'âge de 8 à 15 ans et sont répétées avec une intensité variable selon la densité initiale du peuplement et selon l'objectif de la plantation (protection, production de bois et production de fruits) (Mutke et al., 2012).

7.7. Greffage

L'objectif de greffage des plantations du pin parasol est de permettre une production précoce et abondante de fruits (pignons), ces plantations greffées doivent être installées dans des zones agricoles abandonnées, dégradées, affectées par des incendies ou bien dans des zones où les conditions de climat et de sol sont optimales. Ce système est très employé en Espagne et au Portugal et récemment en Tunisie (Mutke et al., 2012).

Généralement le greffage est procédé lorsque les porte-greffes ont de 2 à 4 ans ; les greffons sont prélevés sur des sujets ou des individus sélectionnés pour les performances de

production des cônes. Les arbres greffés ne produisent que des cônes femelles, le pollen, nécessaire à la fécondation et à la formation du fruit provient soit des anciennes plantations de pin pignon des environs soit de pollinisation artificielles. Les porte-greffes peuvent être de la même espèce soit issue d'un greffage interspécifique (pin pignon sur pin d'Alep) ou (pin pignon sur pin de Monterey) (Mutke et al., 2012).

8. Pathologie du pin pignon

Les ennemis naturels du pin pignon sont très nombreux, s'attaquent à différentes parties de l'arbre. Leurs prolifération est subordonnée à l'existence de conditions climatiques favorables au parasite et parfois à la présence d'hôtes intermédiaires de son cycle (Joly, 1975). Les principaux sont :

8.1. Les insectes

8.1.1. La chenille processionnaire (*Thaumetopoea pityocampa Schiff*)

C'est l'insecte le plus répandue sur pourtour méditerranéen. Les dégâts, même s'ils sont graves, ne causent pas la mort de l'arbre. La présence du parasite se manifeste par la couleur jaune rougeâtre des aiguilles attaquées par les larves au début de l'automne. Au fur à mesure que la saison avance, les nids estivaux apparaissent à l'apex des rameaux. La lutte mécanique se fait par la détérioration des nids déjà formés, la lutte chimique peut être menée par des produits sélectifs tels que le Difluobenzuron. On préfère la lutte biologique essentiellement à base de *Bacillus thuringiensis* (Agrimi et Ciancio, 1993).

8.1.2. La pyrale du pin (*Dioryctria mendacella Stgr*)

C'est un Lépidoptère qui s'attaque aux cônes, les cônelets attaqués en début du développement de 2ème année voient leur croissance immédiatement stoppée. Leur couleur vire au brunâtre ou noirâtre, et ils se dessèchent. Les cônes attaquées au milieu ou en fin de phase de croissance de 2ème année présentent une couleur partiellement ou entièrement rouge à brun-foncé. Les trous d'entrée et de sortie de la chenille sont également signalés par un important amas de résine mêlé à des déjections à la surface du cônelet (Agrimi et Ciancio, 1993). Aucun moyen de lutte n'est disponible sauf l'élimination des cônes infestés.

8.1.3. La pyrale du pin (*Dioryctria pineae* Stgr)

C'est un ravageur mineur des cônes qui sont caractérisés par des zones rougeâtres plus ou moins étendues à la surface et la présence d'amas jaunâtre à rougeâtre correspondant à de la résine mêlée à des déjections liées entre elles par de la soie (Agrimi et Ciancio, 1993).

8.1.4. Le pissode du pin (*Pissodes notatus* Fab)

Les larves grandissent dans l'écorce ou dans le canal médullaire des rameaux. La présence de l'insecte est dénoncée par des symptômes non spécifiques : le jaunissement suivi par le soudain brunissement des aiguilles, le manque d'émission des pousses de mai, la fente de l'écorce avec écoulement de résine (Baronio et Butturini, 1988).

8.1.5. Le pissode du pin (*Pissodes validirostris* Gyll)

Il parasite les cônes femelles en les rendant stériles.

8.1.6. Les Scolytes du pin

Ce sont des coléoptères xylophages, dont la longueur varie entre 2 à 7 mm. Leurs attaques se manifestent par le dessèchement des branches et certains rameaux, le soulèvement de l'écorce par endroits, et l'apparition de petits trous sur l'écorce. Les principales sont : *Tomicus destruens*, *Orthomicus erosus* (Woll), *Ips sexdentatus* (Boerner) et *Pityogenes calcaratus*. La méthode de lutte la plus utilisée consiste à installer des pièges à phéromones pour empêcher les scolytes adultes de venir de coloniser les arbres.

8.1.7. *Lymantria dispar*

Leur hôte principal est le chêne liège (*Quercus suber* L.), en cas de surpopulation il s'attaque les autres essences voisines dont le pin pignon (Baronio et Butturini, 1988).

8.1.8. *Ernobius anatolicus*

Été signalé au Liban comme étant un agent responsable de dégâts sur cèdre et sur pin pignon (Hanna, 2003).

8.1.9. La punaise américaine du pin (*Leptoglossus Occidentalis*)

C'est un hémiptère phytophage d'origine Ouest américain, il a été introduit d'abord dans l'Est américain puis en méditerranée via l'Italie depuis 1999. Il s'attaque aux graines et fleurs

des pinacées (pin et sapin). A l'aide de son stylet buccal, il suce les réserves protéiques et lipidiques des graines. Le traitement chimique à base de carbaryl est efficace pour lutter contre ce ravageur (Loewe et al., 2019).

8.2. Les champignons

8.2.1. *Sphaeropsis sapinea* ou *Diplodia pinea*

C'est l'un des principaux champignons pathogènes des pins au niveau mondial, il est capable de coloniser différents tissus de l'arbre. Les principales manifestations pathologiques dues à cette espèce concernent l'altération des cônes, les nécroses de la pousse apicale et des pousses latérales ainsi que la formation de chancres causant une abondante exsudation de résine. L'infection se manifeste généralement sur des arbres adultes, mais fréquente aussi sur les semis. Ce champignon attaque parfois les graines en cours de germination. La fin du printemps s'est révélée être la période la plus favorable à *Sphaeropsis* (Agrimi et Ciancio, 1993).

8.2.2. *Melanpsora pinitorqua* Rostr

Il s'attaque aux jeunes semis de *P. pinea*. L'infection se manifeste par le dessèchement rapide des jeunes pousses puis la mort des semis. Chez les semis les plus développés, au contraire, les pousses tombent ou se déforment (Agrimi et Ciancio, 1993).

8.2.3. *Thyriopsis halepensis*

C'est un champignon ascomycète pathogène foliaire, il s'attaque aux aiguilles de différentes espèces de pin dont le pin pignon. Au cours de l'été de la contamination, des petites zones colorées disposées en cercle apparaissent sur les aiguilles vertes, le plus souvent à proximité de la gaine. Ce cercle s'agrandit et ça zone centrale devient chlorotique avec une teinte brun-rouge, les aiguilles prennent ensuite une couleur paille, la zone centrale des cercles devient noire et enfin, les aiguilles tombent généralement au printemps de la 3^{ème} année de l'attaque.

Les cimes des arbres attaqués deviennent clairsemées et présentent des aiguilles avec une coloration anormale (Rougisement des pins pignons). Le feuillage vert est alors situé dans le tiers supérieur de la cime. Ce problème constitue également un risque pour les incendies (aiguilles sèches et couvert végétal diminué) (Baronio et Butturini, 1988).

8.2.4. *Cronartium flaccidum* (Alp, Schw)

Rouille vésiculeuse de l'écorce des pins, apparaît sur les rameaux et sur les fûts avec des vésicules jaunâtres. La susceptibilité de *P. pinea* à ce parasite dans les zones littorales de la Toscane est très élevée. Cependant, il n'existe pas d'indications d'attaques de cette rouille sur *P. pinea* en dehors de l'Italie (Agrimi et Ciancio, 1993).

8.2.5. *Armillaria mellea* (Alp, Schw)

Il est caractérisé par une polyphagie extrême, ce champignon attaque généralement les arbres faibles et malades, il affectionne le tronc sur une hauteur de un mètre environ à partir du sol. Il s'agit d'un agent de dessèchement de *P. pinea* (Bernard, 1961).

9. Résistance du pin pignon aux incendies

Généralement les résineux sont plus exposés aux incendies que les feuillées, ces incendies représentent un risque grave pour les pinèdes, notamment pour celles qui sont situées le long du littoral, où la pression anthropique est particulièrement intense. D'après les études existantes, tous les pins sont capables de résister au feu, cependant le degré de résistance est variable d'une espèce à une autre, ce qui permet de guider les choix de forestiers pour constituer une forêt après le passage d'incendie ou aménager préventivement leur territoire.

Le pin pignon est le mieux armé pour tolérer le passage des feux. Cette résistance est expliquée par son écorce épaisse notamment à la base du tronc et sa haute couronne dépourvue de branches basses (Ryan et al., 1994). Une caractéristique unique parmi les pins, jusqu'à 90 % de la canopée de *P. pinea* peut être brûlée sans tuer les arbres. En effet, pour cette espèce seule la partie du volume foliaire roussi permet de juger de la survie de l'arbre aux stress thermique. Il partage le podium des survivants avec le *P. canariensis* et *P. pinaster* en comparaison avec *P. halepensis* et *P. radiata* qui survivent qu'à des faibles intensités de feu. Selon Pageaud (1991), pour une période d'exposition au feu bien déterminée, les températures considérées létales pour les aiguilles de *P. halepensis* sont plus faibles en comparaison avec celles détruisant les aiguilles de *P. pinea*. Cette différence s'explique par le fait que les pins pignon de faible diamètre ont une épaisseur d'écorce à la base du tronc plus importante que celle des pins d'Alep de même diamètre.

Chapitre II

Estimation du Potentiel de Production Forestiere

1. Généralités

Le potentiel de production des peuplements forestiers a historiquement été une préoccupation centrale en foresterie, en raison de sa relation étroite avec la production de bois (Leuschner, 1984 ; Avery et Burkhart, 1994 ; Wenger, 1984), les services écosystémiques tels que la biodiversité et la protection des habitats fauniques (Jenkins et Schaap, 2018 ; Felton et al., 2020) et le stockage du carbone (Davis et al., 2001). Cette préoccupation est devenue urgente récemment en raison de l'augmentation des demandes du marché et de l'impact potentiel du changement climatique (GIEC, 2007), et du renforcement des préoccupations en matière de protection de l'environnement (FAO, 2016). Par conséquent, une estimation précise du potentiel de production ou la productivité forestière semble cruciale dans les décisions de gestion durable des forêts.

2. Objectifs d'estimation de la productivité forestière

L'ensemble des objectifs d'estimation de la productivité cités ci-après ont été énumérés dans les travaux de recherche de Alder (1980) :

2.1. Aménagement forestier

Une gestion forestière est efficace quand le traitement appliqué assure une évolution du peuplement telle que sa valeur économique et/ou sociale augmente plus vite que le coût actualisé du traitement.

Toute coupe a une incidence, plus ou moins grande, sur l'avenir du peuplement sur pied : un taux de récolte trop élevé peut se solder par l'épuisement total de la ressource forestière, tandis qu'un prélèvement trop faible peut à la fois priver une communauté de ressources immédiates et réduire la capacité d'accroissement de la forêt.

Il est évident que l'on ne peut décider rationnellement du traitement, de l'intensité et de la rotation des coupes, que si l'on est capable de quantifier la réponse de la forêt et ces opérations. C'est à quoi visent les études d'accroissement et de production.

2.2. Recherche sylvicole

La connaissance que l'on a du tempérament d'une essence aide à choisir le type de modèle à utiliser pour représenter sa croissance ; dans les forêts complexes, cette connaissance permet de regrouper certaines essences sur des bases logiques. Les caractéristiques sylvicoles d'une essence suggéreront les caractéristiques du modèle correspondant, c'est-à-dire le choix des

relations qui le constituent. Inversement, on peut utiliser un modèle quantitatif, s'il est correct, pour tester des hypothèses sylvicoles et concevoir les traitements et dispositifs expérimentaux susceptibles de fournir des résultats intéressants.

2.3. Recherche écologique et gestion de l'environnement

Des modèles quantitatifs conçus pour prévoir l'accroissement et la production de peuplements forestiers peuvent contribuer à la recherche écologique et à la gestion de l'environnement de plusieurs façons :

- Un modèle forestier peut servir à déterminer la quantité de lumière parvenant au sol, à différents stades du cycle de croissance.
- On peut assez facilement rendre un modèle forestier capable d'indiquer la biomasse et le taux de production du peuplement forestier.
- La connaissance de la période du cycle de croissance pendant laquelle le peuplement est accessible aux grands herbivores est très utile pour la gestion de la faune sauvage.

Les techniques utilisées en modélisation écologique sont en général assez différentes de celles utilisées en foresterie pour les études d'accroissement et de production. Ces dernières doivent en effet s'attacher à prévoir de façon très précise les caractéristiques géométriques du peuplement, alors qu'en écologie on peut traiter comme un tout chaque population et chaque niveau d'un écosystème.

En outre, Les modèles écologiques se consacrent généralement à la description ou à l'explication des traits qualitativement importants d'un écosystème, sans essayer d'atteindre un niveau élevé de précision, d'ailleurs rarement possible ou nécessaire. En revanche, les modèles forestiers doivent être relativement précis s'ils veulent atteindre leur but et donc justifier leur existence. Cependant, il y a des points de contact entre les techniques de la modélisation écologique et celles de la modélisation forestière.

- Dans les forêts hétérogènes, la composition en essences peut être modélisée par des techniques de dynamique des populations.
- On peut quantifier la mortalité, les altérations du bois ou les pertes d'accroissement dues à une maladie ou une attaque parasitaire d'étiologie connue, à l'aide d'un modèle de dynamique de population dans lequel : l'information sur "l'habitat" est tirée d'un modèle forestier, l'accroissement des arbres est influence' par le niveau de population du parasite.

3. Les concepts de productivité forestière, de site, de qualité et productivité de site

3.1. Productivité forestière

Le terme de productivité forestière a été largement utilisé dans la littérature relative à la foresterie (Crow et al., 2006 ; Keeling et Phillips, 2007 ; Zhang et al., 2012 ; Van Bogaert et al., 2015). Cependant, ce terme peut avoir des significations différentes selon les personnes. Deux significations peuvent être identifiées : l'augmentation cumulative et l'augmentation annuelle nette du volume forestier.

Oдум (1959) distingue la productivité primaire (vitesse à laquelle l'énergie est stockée par l'activité photosynthétique des organismes producteurs, principalement les plantes vertes) et la productivité secondaire (vitesse à laquelle le carbone stocké par les producteurs primaires est assimilé par les animaux ou les décomposeurs). La productivité primaire se subdivise en productivité primaire brute, "le taux total de photosynthèse, y compris la matière organique utilisée par la respiration pendant la période de mesure", et en productivité primaire nette (PPN), "le taux de stockage de la matière organique dans les tissus végétaux en excès par rapport à l'utilisation respiratoire par les plantes pendant la période de mesure". Dans le contexte d'une forêt, la PPN comprend non seulement la biomasse des arbres, mais aussi celle des herbes et des arbustes, bien que la biomasse des herbes et des arbustes soit généralement négligeable par rapport à celle des arbres. Ces définitions sont devenues standards dans la littérature forestière et écologique. Ainsi, la productivité nette des arbres (les éléments qui intéressent les forestiers) est généralement très proche de la PPN. Le terme "productivité" est remarquable, car il s'agit d'un taux qui implique l'acquisition de photosynthèse par unité de temps (Skovsgaard et Vanclay, 2008).

Du point de vue de la foresterie, la productivité forestière est souvent définie comme le volume de la forêt sur pied à un instant t , V_t , qui correspond à l'augmentation cumulative du volume du peuplement depuis sa création (à $t = t_0$). Elle est appelée rendement dans les études sur la croissance et le rendement des forêts (Avery et Burkhart, 1994 ; Weetman et Mitchell, 2013).

Il importe de faire une distinction nette entre la productivité potentielle (ou naturelle ou optimale possible) et la productivité actuelle (ou artificielle). En principe, la première concerne une production optimale conditionnée par les propriétés intrinsèques des stations et relative à des peuplements «idéaux» d'essences cultivées ou naturelles ; la seconde a trait à la

production réelle constatée d'une station dans ses composantes actuelles (sol, peuplement, traitement, accidents, etc...) (Rondeux, 1993).

Généralement, le terme productivité est utilisé pour rendre compte de l'accumulation de bois de tige au-dessus du sol dans les arbres sur pied, bien qu'il puisse également inclure l'accumulation souterraine. Le V_t augmente généralement avec l'âge du peuplement et, en général, un tracé du volume dans le temps a une forme sigmoïde qui asymptote à la capacité de charge du site. La productivité forestière est généralement la base de l'évaluation de l'inventaire forestier actuel, de la planification, de la bio-économie, de la gestion durable des forêts et de l'évaluation de l'approvisionnement en ressources actuelles et futures (Skovsgaard et Vanclay, 2008).

3.2. Site

Le terme site désigne un lieu géographique considéré comme homogène du point de vue de son environnement physique et biologique. En foresterie, le site est généralement défini par le potentiel de l'endroit à soutenir la croissance des arbres, souvent dans l'optique d'une sylviculture spécifique au site. Les sites peuvent être classés en types de sites en fonction de leurs similitudes en matière de climat, de topographie, de sols et de végétation. La classification des sites peut servir une série d'objectifs de gestion, notamment la stratification écologique pour optimiser l'estimation de la productivité des sites forestiers (Skovsgaard et Vanclay, 2008).

3.3. Qualité de site

Bien que les termes "qualité du site" et "productivité du site" soient souvent utilisés de manière interchangeable, ils ne sont pas synonymes. La qualité du site fait référence à la combinaison de facteurs physiques et biologiques caractérisant un emplacement géographique ou un site particulier, et peut impliquer une classification descriptive. Les propriétés qui déterminent la qualité du site sont généralement inhérentes au site, mais peuvent être influencées par la gestion (Skovsgaard et Vanclay, 2008).

3.4. Productivité de site

La productivité du site est une estimation quantitative du potentiel d'un site à produire de la biomasse végétale, et englobe deux concepts : le potentiel du site et la partie du potentiel du site réalisée par un peuplement forestier donné.

Au sens large, le potentiel du site est la capacité du site à produire de la biomasse végétale (production primaire nette), quelle que soit la part de ce potentiel utilisée par la végétation. Le terme de productivité du site est souvent utilisé dans un sens plus étroit pour désigner la partie du potentiel du site qui est ou devrait être réalisée par les arbres pour la production de bois.

Nous utilisons le terme de productivité du site au sens strict, à savoir la production qui peut être réalisée sur un certain site avec un géotype donné et un régime de gestion spécifique. Cette production dépend à la fois de facteurs naturels inhérents au site et de facteurs liés à la gestion. Dans les forêts gérées, le potentiel inhérent au site est largement déterminé par les caractéristiques du sol et les facteurs climatiques.

La gestion peut affecter le potentiel de production par le biais d'options sylvicoles telles que la préparation du site, le choix des espèces d'arbres, la provenance, l'espacement, l'éclaircie et la méthode de régénération. En outre, les conditions environnementales de la forêt environnante (par exemple, l'effet d'abri contre le vent des peuplements voisins) et les aspects pratiques des opérations forestières (par exemple, les dommages causés aux arbres cultivés et le compactage du sol) peuvent également influencer le potentiel de production. À son tour, la gestion peut également affecter la qualité du site et donc le potentiel inhérent du site (Skovsgaard et Vanclay, 2008).

4. Approches de l'évaluation de la productivité forestière

La productivité forestière peut être évaluée de plusieurs façons, généralement classées en méthodes géocentriques (basées sur la terre) ou phytocentriques (basées sur les plantes) (Hägglund, 1981 ; Leary, 1985 ; Wenk et al., 1990 ; Vanclay, 1994).

Les indicateurs de productivité géocentriques sont basés sur les propriétés du site, notamment les caractéristiques physiques : du climat, de la topographie ou du sol, alors que les indicateurs phytocentriques sont basés sur des caractéristiques de la végétation.

En foresterie, les indicateurs phytocentriques se rapportent souvent au peuplement forestier, aux arbres qui composent le peuplement ou aux composantes des arbres individuels, et peuvent être classés comme dendrocentriques ou dendrométriques. Cette dernière catégorie peut être considérée comme directe ou indirecte, en fonction de la relation étroite entre l'indicateur et la production de volume de bois.

La classification (géocentriques, phytocentrique) ne présuppose pas qu'une approche est "meilleure" ou préférable à une autre. La méthode la plus appropriée peut dépendre de l'objectif et de l'échelle. Par exemple, pour une espèce donnée dans une région de croissance,

la hauteur du peuplement peut être l'indicateur de productivité le plus pratique parce qu'elle est bien corrélée à la croissance en volume, alors qu'une combinaison de variables climatiques peut ne donner qu'une estimation approximative de la productivité. Cependant, les indicateurs climatiques tels que l'indice de Paterson basé sur la température, les précipitations et le rayonnement (Paterson, 1956, 1962) peuvent être plus appropriés pour les comparaisons générales entre les espèces et les régions (Skovsgaard et Vanclay, 2008).

En raison de sa relation étroite avec les propriétés du site et donc avec son potentiel, l'approche géocentrique a été largement utilisée en agriculture pour l'évaluation des sites, par exemple en utilisant la classification texturale des strates supérieures du sol comme une base de la fertilité. En foresterie, cependant, l'approche géocentrique n'est pas toujours pratique, abordable ou suffisamment précise pour les applications de gestion. Ainsi, l'approche dendrométrique domine et plus pratique où une combinaison de plusieurs variables facilement mesurables relatives aux arbres ou aux peuplements est utilisée pour estimer la productivité du site. Parmi ces variables il convient de souligner l'importance du sol (profondeur, texture, drainage....) de la topographie (pente, altitude, exposition, géomorphologie....) (Colle et Schumacher, 1953 ; Page, 1970 ; Sprackling, 1973) et du climat (Lemoine, 1969).

5. Évolution de l'estimation de la productivité des sites forestiers

Plusieurs indicateurs ont été testés et sont utilisés pour différents types de forêts, mais la hauteur des peuplements semble être l'indicateur de productivité des sites le plus largement utilisé, le plus accepté et le plus polyvalent, notamment pour les forêts équiennes (Hägglund, 1981 ; Kramer, 1988 ; Wenk et al., 1990 ; Vanclay, 1994 ; Pretzsch, 2001 , 2002 ; Avery et Burkhart, 2002 ; Burger, 2004 ; Skovsgaard, 2004). Dans cette section, nous présentons brièvement le contexte historique et nous soulignons certains résultats de recherche cruciaux qui ont contribué à façonner et continuent d'influencer notre compréhension de la productivité des sites forestiers.

5.1. Classification des sites en fonction de la hauteur des peuplements

Avec l'introduction des méthodes scientifiques dans la sylviculture en Europe, il y a 200 à 300 ans, les premières tentatives d'évaluation et de classification du potentiel de production des sites forestiers ont adopté une approche géocentrique.

Au début, il était courant d'utiliser des classifications générales, telles que " sol argilo-limoneux de basse altitude ayant une capacité de production moyenne pour le hêtre " (Hartig,

1795, 1847 ; Paulsen, 1795 ; Reventlow, 1816, 1879). Plus tard, les classes de sites ont été indexées par le volume sur pied (Von Wimpfen, 1836 ; Pressler, 1870). La production de bois a été estimée à l'aide de "tables d'expérience" spécifiques au site, précurseurs des tables de rendement et des modèles de croissance. Les tables d'expérience ont été construites sur la base d'un peuplement moyen ou d'un peuplement type, c'est-à-dire un peuplement individuel censé refléter le développement typique du peuplement.

Vers la fin du dix-neuvième siècle, on s'est rendu compte que la hauteur moyenne d'un peuplement à un âge donné était une mesure pratique de la productivité d'un site, et une classification basée sur les espèces et les modèles de développement de la hauteur typiques d'un site a été introduite. En tant que mesure de la productivité du site, la classe de site est souvent désignée par une variable de classe, tandis que l'indice de site fait généralement référence à la hauteur de peuplement attendue (ou réalisée) à un âge de référence donné. L'introduction de la classification des sites en fonction de la hauteur des peuplements est la conséquence de quelque 100 ans de travail avec des tables d'expérience qui ne disposaient pas d'un indicateur non ambigu de la croissance actuelle ou future du volume des peuplements.

Bien que Oettelt (1764) ait fait allusion à la hauteur du peuplement comme indicateur de productivité, Heyer (1841) a probablement été le premier à identifier, sur une base scientifique, une corrélation entre la croissance en hauteur et la croissance en volume. Par la suite, plusieurs chercheurs allemands ont suggéré la hauteur comme indicateur de la productivité du site, mais l'honneur est généralement attribué à Baur (1877), qui a été le premier à construire un tableau de rendement avec une classification des sites en fonction de la hauteur du peuplement.

L'argument initial en faveur du choix de la hauteur comme indice de productivité du site était que la relation entre la hauteur moyenne et l'âge ressemblait à la relation entre le volume de la récolte et l'âge (Baur, 1877, 1881 ; Gyldenfeldt, 1883). La validité de cet argument est due au fait qu'à cette époque, les peuplements forestiers de cette région du monde étaient peu éclaircis, n'éliminant souvent que les arbres morts. Néanmoins, l'argument clé est que la hauteur ou la croissance en hauteur du peuplement devrait être bien corrélée à la croissance en volume du peuplement. Dans une perspective plus large, l'utilisation de la hauteur d'un peuplement comme indicateur de la productivité d'un site repose généralement sur la conviction que dans les peuplements équiennes, la croissance en hauteur des arbres les plus grands ou dominants est à peu près indépendante du nombre de tiges. Ceci est valable pour une large gamme d'espacements initiaux et de degrés d'éclaircie couramment utilisés pour de

nombreuses espèces dans la pratique forestière, à condition que l'éclaircie ne se fasse pas par le haut (Sjolte- Jørgensen, 1967 ; Evert, 1971 ; Bredenkamp, 1984 ; Lanner, 1985).

Cependant, il est bien établi que des densités de tiges élevées ou faibles, dues à l'espacement ou à l'éclaircie, peuvent influencer sur la hauteur des peuplements par rapport à des peuplements similaires ayant des densités de tiges plus " normales " (Bryndum, 1980 ; Harrington et Reukema, 1983 ; Johannsen, 1999 ; Mac Farlane et al. 2000 ; De Bell et Harrington, 2002 ; Kerr, 2003). Cela semble dépendre de plusieurs facteurs, dont les conditions du site, l'âge et la tolérance à l'ombre de l'espèce.

Les arbres utilisés dans l'estimation de l'indice du site doivent se classer parmi les classes sociales supérieures. La hauteur supérieure et la hauteur dominante, qui les représentent, sont les moins affectées par les éclaircies et sont les indicateurs de la productivité du site basés sur la hauteur les plus stables. La classification de la productivité du site en fonction de la hauteur du peuplement s'est rapidement imposée comme faisant partie de la norme allemande pour les tableaux de rendement (Ganghofer, 1881). Malgré un certain scepticisme initial (Weise, 1880 ; Oppermann, 1887; Hartig, 1892), la hauteur a rapidement été acceptée comme l'indicateur de site le plus approprié (Gram, 1879 ; Jonson, 1914). Quelques années plus tard, un débat similaire en Amérique du Nord (Tesch, 1981 ; Monserud, 1987) a également conduit à ce que la hauteur des peuplements soit l'indicateur établi de la productivité des sites forestiers.

La croissance périodique de la hauteur a été utilisée comme un indicateur alternatif de la productivité du site. Elle semble avoir été développée indépendamment par plusieurs chercheurs (Bull, 1931 ; Møller, 1933 ; Ferree et al., 1958 ; Wakely et Marrero, 1958), et est connue sous le nom de méthode de l'interception de la croissance en hauteur. La croissance périodique en hauteur peut être plus fiable que la hauteur du peuplement dans les jeunes peuplements, dans les peuplements d'âge inconnu, dans les peuplements où le potentiel actuel de croissance en volume ne se reflète pas bien dans la hauteur du peuplement (par exemple, lorsque la croissance en hauteur a été entravée par le gel ou le broutage) et lorsque le schéma de croissance spécifique au site s'écarte de celui impliqué dans le système de classification.

Lorsque les dommages dus au gel ou au broutage des jeunes sont un problème, l'estimation de l'indice du site est souvent basée sur l'âge et la hauteur. Les estimations de la productivité du site dérivées d'observations à court terme de la croissance périodique de la hauteur sont susceptibles de subir des variations climatiques et autres. Sont sensibles aux variations climatiques et autres de la croissance et peuvent être moins précises que les estimations basées sur la hauteur du peuplement (Skovsgaard et Vanclay, 2008).

Au fil du temps, plusieurs méthodes ont été utilisées pour établir des modèles de croissance de la hauteur spécifiques au site (Hägglund, 1981 ; Tesch, 1981 ; Clutter et al., 1983 ; Holten-Andersen, 1989 ; Pretzsch, 2001, 2002 ; Avery et Burkhart, 2002).

Les premières courbes de classes et d'indices de sites étaient établies à l'aide de lignes tracées à la main et de procédures mathématiques simples, mais aujourd'hui les méthodes basées sur les statistiques prévalent. Celles-ci peuvent employer une gamme d'approches différentes en utilisant soit des données sur les arbres individuels ou les peuplements, soit des données sur les parcelles temporaires ou permanentes, soit la hauteur totale ou la croissance périodique de la hauteur, ainsi que la moyenne de toutes les observations, la moyenne d'observations sélectionnées ou les extrêmes des observations pour établir le développement typique de la hauteur en fonction de l'âge.

Le modèle sous-jacent peut permettre un développement anamorphique ou polymorphique (c'est-à-dire des proportions fixes ou variables entre les classes de sites) et peut ou non tenir compte des corrélations spatiales et temporelles dans les données (Bailey et Clutter, 1974). Les courbes d'indice de site peuvent être indexées par la hauteur du peuplement à un âge donné (approche traditionnelle) ou un (ou plusieurs) des paramètres de la fonction peut être utilisé directement comme indicateur de la productivité du site. Chaque combinaison unique de ces approches a des implications différentes pour le système résultant.

La classification des sites par la hauteur du peuplement est devenue l'une des pratiques les plus universelles en foresterie, et est reconnue comme l'un des indicateurs les plus appropriés de la productivité du site à des fins de gestion dans les peuplements forestiers équiennes (Hägglund et Lundmark, 1977 ; Monserud, 1984 ; Schönau, 1987 ; Rayner et Turner, 1990).

La classification des sites en fonction de la hauteur dominante des peuplements trouve son origine dans les forêts régulières de type plantation ayant de bons antécédents de gestion et dans les peuplements équiennes, mono-spécifiques, bien peuplés et d'âge connu. Cependant, elle est également utilisée pour des types de forêts plus complexes ou irrégulières, avec ou sans antécédents de gestion ou d'enregistrements (Vanclay et Henry, 1988 ; Vanclay, 1992).

Après avoir été une mesure provisoire de la productivité d'un site, la classification des sites en fonction de la hauteur a été largement acceptée, au point que la classe ou l'indice de site est souvent considéré comme la "véritable" production de volume actuelle ou potentielle,

plutôt que comme un simple indicateur qui peut ou non refléter le potentiel du site (Skovsgaard et Vanclay, 2008).

5.2. La loi d'Eichhorn

Une autre conséquence des premiers efforts pour construire des tables de rendement est la loi dite d'Eichhorn. Selon la loi d'Eichhorn, la production totale en volume d'une espèce d'arbre donnée à une hauteur de peuplement donnée doit être identique pour toutes les classes de sites. Eichhorn (1902) a découvert à l'origine que le volume des arbres de production dans les peuplements de sapins blancs européens (*Abies alba* Mill.) légèrement éclaircis dépend uniquement de la hauteur du peuplement (c'est-à-dire indépendamment de l'âge et de la surface terrière). Par la suite, cette relation a été confirmée pour d'autres espèces d'arbres (Eichhorn, 1904 ; Gehrhardt, 1909), et elle a été étendue par Gehrhardt (1921) pour s'appliquer à la production totale en volume ou au rendement brut en volume. Le concept a également été utilisé dans d'autres domaines, par exemple, pour définir les modèles régionaux de production végétale (Specht, 1999).

La loi d'Eichhorn étendue a été largement utilisée dans la construction de tables de rendement et de modèles de croissance (Mitchell, 1969 ; Alder, 1980 ; Edwards et Christie, 1981 ; Holten-Andersen, 1989 ; Philip, 1994 ; Peterson et al., 1997 ; Savill et al., 1997). Elle peut également s'avérer très utile pour ajuster les modèles généraux à des conditions locales de croissance ou de gestion qui diffèrent. La loi étendue postule que deux peuplements ayant une croissance en hauteur identique et une hauteur initiale identique auront une croissance en volume identique, indépendamment de toute différence d'âge. Cela implique que la croissance en volume d'un peuplement peut être estimée à partir de la croissance en hauteur, si l'on dispose d'un modèle général ou d'un peuplement de référence de la même espèce dont la croissance en volume est connue. La loi d'Eichhorn est souvent utilisée sans tenir compte des différences possibles entre les peuplements en termes d'espacement initial, de régime d'éclaircie ou de provenance (Skovsgaard et Vanclay, 2008). Dans ces conditions, il serait sans doute plus strict de préciser que la loi d'Eichhorn concerne la production totale correspondant à l'accroissement courant maximum (Decourt, 1973).

5.3. L'hypothèse de la réaction aux éclaircies

À partir de la fin du dix-neuvième siècle, des expériences d'éclaircie ont été mises en place en Europe, puis dans d'autres parties du monde, pour aider à optimiser les traitements des

peuplements dans les forêts gérées. L'un des objectifs était, et est toujours, d'étudier les effets des différents traitements d'éclaircie (degré, intensité, fréquence, moment et type d'éclaircie). L'un des principaux résultats de ces expériences et d'autres expériences d'éclaircie est que l'éclaircie n'influe pas de manière significative sur la croissance du volume du peuplement pour une large gamme de degrés d'éclaircie ou de densités de peuplement, alors qu'une éclaircie plus forte au-delà de cette gamme réduit la croissance du volume. Les preuves empiriques de l'hypothèse de la réaction aux éclaircies proviennent principalement de peuplements éclaircis essentiellement par le bas. Sauf indication contraire, l'hypothèse fait généralement référence au volume total des tiges aériennes pour les conifères et au volume total du bois aérien pour les feuillus (Skovsgaard et Vanclay, 2008).

Plusieurs scientifiques ont contribué à la formulation de l'hypothèse de la réponse à l'éclaircie dans le processus graduel d'interprétation des résultats expérimentaux pour différents types de sites, d'espèces d'arbres et d'âges de peuplements. L'hypothèse a été promue et quantifiée notamment par Wiedemann (1932 ; 1937; 1951), Langsæter (1941) et Møller (1944 ; 1951 ; 1954), bien que sous des formes légèrement différentes. Les principales différences portent sur la nature de leurs données, sur le choix de la référence pour comparer les différents traitements d'éclaircie entre les espèces, les sites et les âges et sur les détails de l'interprétation de la réponse à l'éclaircie. Wiedemann a étudié l'éclaircie par le bas et l'éclaircie de couronne. Il a utilisé des parcelles modérément éclaircies par le bas comme référence. Langsæter a étudié spécifiquement la réponse des forêts ouvertes et des peuplements très denses. Il a utilisé le site non peuplé comme référence logique (c'est-à-dire que sans arbres = pas de croissance). Møller a privilégié le peuplement non éclairci et entièrement peuplé comme référence. Wiedemann et Møller ont tous deux maintenu l'idée que l'éclaircie n'a généralement pas d'influence significative sur la croissance du volume du peuplement pour une large gamme de pratiques d'éclaircie (de l'absence d'éclaircie à la forte éclaircie), tandis que Langsæter était plus préoccupé par le modèle de la réponse.

Assmann (1956) a également clarifié les concepts et les détails concernant les effets de l'éclaircie sur la croissance en volume des peuplements. En utilisant des parcelles témoins non éclaircies comme référence, il a démontré que la croissance en volume peut être plus sensible à l'éclaircie que ne l'indique l'hypothèse de la réponse à l'éclaircie. Comme il a proposé un cadre de référence pour l'analyse des effets de l'éclaircie, en suggérant le témoin non éclairci comme norme, avec la surface terrière moyenne entre deux éclaircies consécutives comme indicateur du degré d'éclaircie.

L'effet des éclaircies sur la croissance en volume des peuplements reste un sujet de recherche important et une question clé dans les manuels, mais les analyses manquent souvent d'un cadre de référence rigoureux pour l'évaluation.

6. Principales méthodes quantitatives d'estimation et indices de productivité

Selon Rondeux (1993), les principales méthodes peuvent être regroupées en 3 types :

- méthodes dendrométriques directes : le critère de productivité concerne la production totale de matière ligneuse, soit le volume total produit à un âge de référence, soit l'accroissement annuel moyen en volume à ce même âge.
- méthodes dendrométriques indirectes : le critère de productivité est défini par une caractéristique dendrométrique en liaison étroite avec la production totale en volume.
- méthodes mixtes : le critère de productivité résulte de l'association de caractéristiques dendrométriques et de diverses variables du milieu (sol, flore, topographie, climat, etc...).

Les deux premières méthodes sont essentiellement de nature dendrométrique et s'adressent spécifiquement aux peuplements, elles font intervenir des indices «dendrométriques», la troisième méthode permet par contre d'associer les indices dendrométriques et les facteurs de l'environnement sous la forme d'indices «mixtes».

6.1. Méthodes dendrométriques directes

Les méthodes directes visent à estimer le volume total produit sur une station donnée et sur une période de temps donnée. Elles sont en principe les plus recommandables et sont applicables aussi bien en peuplements homogènes équiennes qu'en peuplements hétérogènes mélangés.

6.1.1. Productivité basée sur la production totale en volume

Le volume total de matière produite à un âge donné, le plus souvent à l'âge de référence de 100 ans, est l'expression dendrométrique la plus stricte de la productivité d'un milieu forestier. L'utilisation de ce critère n'est cependant pas très pratique, si l'on songe aux calculs longs et fastidieux que sa détermination nécessite (risques d'oublis ou d'erreurs de comptabilisation du matériel prélevé en éclaircie, pertes d'informations) et à l'obligation d'utiliser des volumes de référence strictement identiques (adéquation des tarifs de cubage) correspondant généralement au bois fort de la tige du moins en ce qui concerne les résineux.

En pratique, initialement, la méthode est basée sur la division de la production totale en classes ou en niveaux de productivité pour des peuplements purs équiennes et de densité normale, se développant dans un domaine de croissance donné (Rondeux, 1993).

6.1.2. Productivité basée sur l'accroissement annuel moyen total en volume

La productivité peut aussi être exprimée au moyen de l'accroissement moyen annuel total en volume à un âge donné, par exemple à 100 ans, cet accroissement étant évidemment en relation directe avec le volume total dans les peuplements à structure équiennne.

Souvent, on préconise d'utiliser comme critère de productivité, dans le cas des peuplements qui le permettent, le maximum d'accroissement moyen annuel en volume. Ce procédé élimine le problème de choix, toujours discutable, d'un âge de référence. Dans de très nombreux cas, ce critère est envisagé simultanément avec des estimations indirectes de la productivité basée sur la hauteur (Rondeux, 1993).

6.1.3. Productivité basée sur l'accroissement périodique en volume

Dans les peuplements non équiennes ou jardinés, dans lesquels l'âge n'a plus de sens, le seul critère de station acceptable mettant le volume en œuvre est l'accroissement périodique (Dagnelie, 1957) ou l'accroissement annuel. Il convient, à cet effet, de posséder des informations complètes sur les éclaircies effectuées et sur l'évolution du matériel ligneux durant une période donnée.

6.2. Méthodes dendrométriques indirectes

6.2.1. Productivité basée sur la hauteur dominante d'un peuplement

C'est la méthode indirecte d'estimation la plus utilisée. Le principe de cette méthode consiste à apprécier valablement la production totale en volume d'un peuplement à partir de sa hauteur dominante, qui est par convention la hauteur de l'arbre de surface terrière moyenne des 100 plus grosses tiges à l'hectare. A ce titre, la hauteur moyenne du peuplement, à un âge de référence donné (50 ans, par exemple), constitue un indice de productivité intéressant à condition cependant d'être peu sensible au traitement sylvicole et de refléter, aussi étroitement que possible, le potentiel de la station : de nombreuses recherches ont permis de montrer que la hauteur moyenne des arbres dominants était celle qui répondait le mieux à ces exigences (Kramer, 1959). Le choix de la hauteur dominante est lié à certaines hypothèses ou «lois» relatives à la croissance en volume des peuplements.

6.2.2. Productivité basée sur la croissance périodique en hauteur

Dans les jeunes peuplements (inférieurs à 20 ans ou n'ayant pas encore atteint le stade de la première éclaircie), la mesure de la hauteur dominante pose de sérieuses difficultés, de plus la moindre erreur dans l'âge affecte très sérieusement la détermination de l'indice de station.

Pour remédier à cet inconvénient il existe une méthode basée sur la mesure de la croissance en hauteur réalisée par chaque arbre durant les cinq années qui suivent l'époque à laquelle le niveau hauteur d'homme a été atteint. On admet l'hypothèse que les arbres d'une espèce donnée, plantés à large écartement et ayant atteint le niveau hauteur d'homme sur des stations comparables, grandissent à des vitesses très voisines durant au moins les 5 années qui suivent.

Selon Day et al. (1960), il existe une relation étroite entre la hauteur dominante à un âge donné et la longueur inter-nodale correspondant à une croissance en hauteur de 5 ans, mesurée à partir du niveau hauteur d'homme.

6.3. Méthodes mixtes

Ces méthodes ont pour objet de mettre en relation les indices dendrométriques (ex : la hauteur dominante à un âge donné) avec les facteurs de l'environnement. Les raisons de cette approche résident entre autres dans l'intérêt de pouvoir estimer le «site-index» en l'absence de peuplements, par relation avec des facteurs relatifs à la station et dans le souci d'améliorer la précision offerte par l'utilisation des seules variables dendrométriques. La construction de tables de production par voie mathématique ayant permis d'attirer l'attention sur la variabilité pouvant exister dans les relations entre le volume total et la hauteur dominante (Parde, 1976), de nombreuses et récentes recherches ont consisté à associer indices dendrométriques et variables du milieu, soit en vue de définir de nouveaux indices «indices mixtes», soit en vue d'élaborer des modèles de croissance ou des fonctions de production.

Cette approche «factorielle» peut se concevoir, en pratique, de la manière suivante :

- choix préalable de facteurs de l'environnement liés à la hauteur dominante ;
- élimination des variables peu aisées à récolter ou trop complexes ;
- matérialisation de points de sondage dans les peuplements aptes aux mesures et susceptibles de présenter tous les éléments de variabilité (âges, conditions écologiques) ;
- récolte des données ;

- régression de la hauteur dominante avec les variables explicatives présentant la contribution la plus significative à la précision de l'estimation (examen de la matrice des coefficients de corrélation, introductions ou éliminations progressives de variables).

7. Estimation de la production fruitière des espèces ligneuses

Il existe généralement trois différentes méthodes pour la récolte et l'évaluation de la production fruitière chez les ligneux :

- Comptage du nombre total de fruits à travers la récolte intégrale des fruits,
- Comptage des fruits tombés sous l'arbre à travers un ramassage périodique des fruits,
- Comptage par extrapolation.

7.1. Comptage du nombre total de fruits à travers la récolte intégrale des fruits

La méthode la plus simple pour la mesure de la production fruitière est le comptage direct (Cunningham, 2001). Peters (1996), a préconisé la méthode qui consiste à récolter la totalité des fruits en secouant les branches ou en utilisant les gaules. Cette récolte en un seul passage concernera les fruits arrivés au stade de pleine maturation. Pour tenir compte des facteurs abiotiques pouvant influencer la production en fruits au stade de pleine maturation, il sera nécessaire de faire un pré-comptage au stade de nouaison pour déterminer un facteur correctif.

7.2. Comptage des fruits tombés sous l'arbre à travers un ramassage périodique des fruits

La méthode consistant à compter les fruits tombés sous l'arbre à travers un ramassage périodique des fruits. Son application nécessite l'implication de la population et la mise en place d'un dispositif adapté permettant de ramasser les fruits au fur et à mesure qu'ils tombent. L'efficacité du travail de récolte peut être améliorée en étalant sous les arbres de grandes toiles ou des bâches pour recueillir les fruits qui tombent. Ainsi, la production totale d'un arbre devient la somme des récoltes journalières (Lamien et al., 2007).

7.3. Comptage par extrapolation

Lorsque la méthode du comptage direct devient impraticable, la méthode par extrapolation peut être envisagée. Celle-ci consiste à compter :

- le nombre total de branches fructifères à partir de la première ramification basale ;
- le nombre de fruits présents sur le quart des branches fruitières choisies au hasard.

Ce nombre de fruits est ensuite extrapolé au nombre total de branches fructifères pour estimer le nombre total de fruits pour un arbre (Kouyaté et al., 2016).

Chapitre III

Présentation de la

Zone d'Etude

1. Généralités

Cette partie est consacrée à une description générale de la région de Mostaganem ainsi que les différentes caractéristiques analysées afin de donner les indications géographiques et écologiques, bases indispensables à la future compréhension des mécanismes de dynamique des ressources naturelles. En effet, la variation des reliefs, la lithologie, le climat et l'état des ressources naturelles renseignent sur le type de réponse globale. Les principales caractéristiques géomorphologiques et biophysiques de l'espace étudié ont une importance majeure car elles interviennent, et souvent d'une façon combinée, dans l'évaluation des potentialités et des contraintes de cet espace.

2. Situation géographique

La région de Mostaganem, d'une superficie de 2269 km² située au Nord-Ouest du territoire algérien. Elle s'étend géographiquement entre les méridiens 0°8' Ouest et 0°46' Est et entre les latitudes 36°29' et 35°37' Nord. Elle est bordée, au Nord et au Nord-Ouest par la mer Méditerranée, avec une façade maritime de l'ordre de 120 km, à l'Est par la wilaya de Chlef, au Sud par les wilayas de Mascara et de Relizane, et à l'Ouest par la wilaya d'Oran.

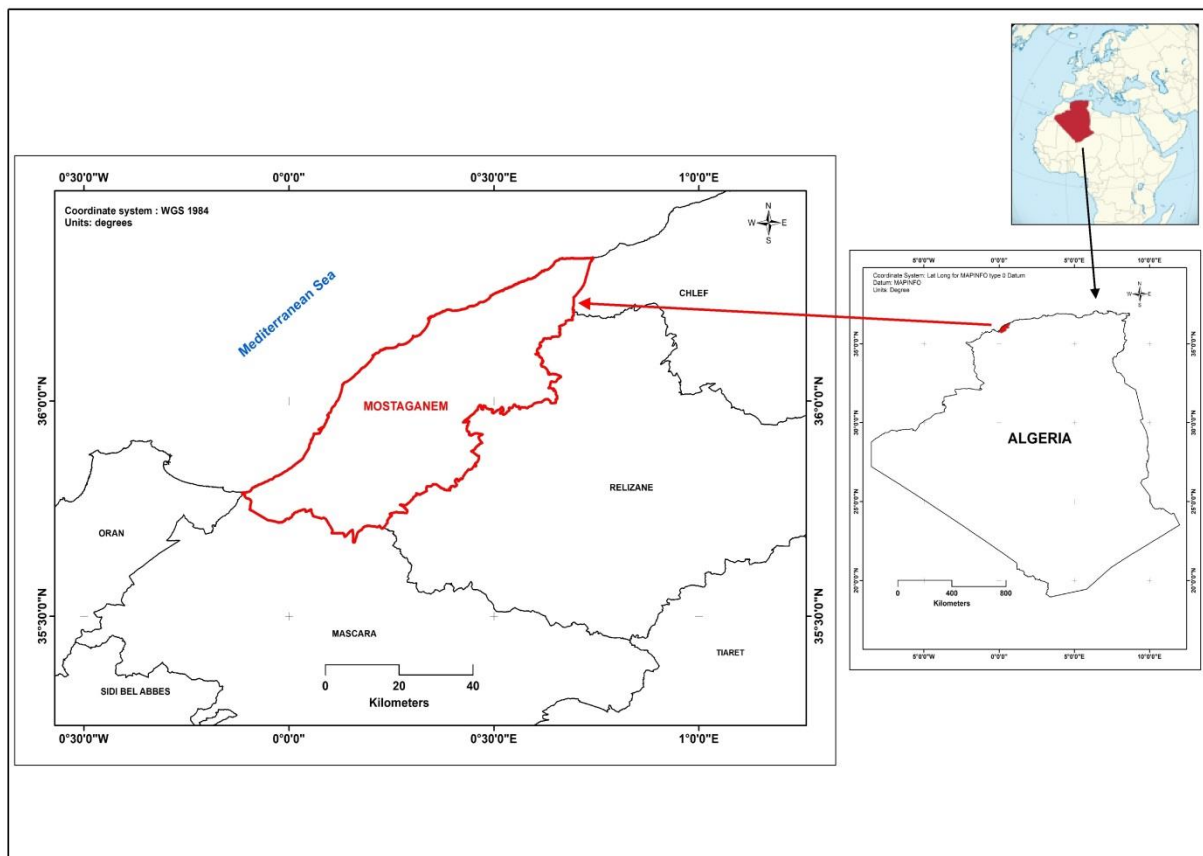


Figure 7. Situation géographique de la zone d'étude

3. Caractéristiques physiques

3.1. Cadre morphologie

La variation des reliefs et la diversité de l'espace, subdivisent la zone d'étude en plusieurs unités morphologiques qui lui permet de posséder d'énormes potentialités naturelles.

3.1.1. Le cordon littoral

Cette zone homogène constitue la frange située au littoral de la zone d'étude et se compose de formation de sables mobiles qui constituent les différentes plages de la région, ainsi que des formations dunaires mobiles ou consolidées jalonnant l'ensemble de la côte.

Entre la mer et les monts du Dahra, des vallées et des plaines littorales forment un ensemble qui s'élargit vers le nord. Le soubassement est presque exclusivement marneux au centre et au sud. Des flyschs apparaissent également dans la partie nord (Zaoui, 2015).

3.1.2. Les monts du Dahra

Les monts du Dahra font partie intégrante de l'ensemble des massifs telliens de l'Algérie du Nord. La partie de ces monts comprise dans la zone d'étude constitue le prolongement à l'ouest de ces monts. Ils sont constitués de marnes, de flyschs et de grès formant une chaîne accidentée, drainée par un réseau hydrographique très dense. Les sommets atteignent de 300 m (djebel Rahara) à plus de 550 m d'altitude (djebel Lakkaf). Sur des pentes assez fortes, les sols sont souvent peu évolués (Boulaine, 1955).

3.1.3. La vallée du Chélif

La vallée du Chélif fait partie de la plaine du Chélif qui forme dans sa partie orientale une bande d'une dizaine de kilomètres de largeur qui draine le Chélif depuis la région de Chleff jusqu'à son confluent avec l'oued Mina. Le tracé du cours d'eau est sinueux et présente des méandres tout au long de la partie comprise dans la zone d'étude. La vallée présente par ailleurs de larges terrasses dans la partie amont et centrale et continue en rétrécissant pour ne plus contenir des terrasses jusqu'à l'embouchure où l'oued s'encaisse profondément (Zaoui, 2015).

3.1.4. Le plateau de Mostaganem

Il est situé sur une longitude comprise entre 0°6 Ouest et 0°26 Est et sur une latitude Nord comprise entre 35°40 et 36°01. Le plateau de Mostaganem présente un relief relativement ondulé, s'abaissant sur la plaine d'El Habra et le Golfe d'Arzew, il est bordé au Sud-Est par une ligne de reliefs jalonnée par les forêts d'Enaro et d'Akboub qui le sépare de la plaine de Relizane. Les altitudes sont généralement comprises entre 50 et 300 m, mais elles dépassent localement 450 m. Au nord, le plateau surplombe la mer et le bas Chélif par un escarpement haut de 150 à 200 m. Les sols sont de type décalcifié rubéfié, souvent lessivés, passant souvent à des sols dunaires. Ils peuvent présenter en profondeur des encroûtements calcaires. Dans les bas-fonds se sont accumulés des matériaux riches en matière organique (Boulaine, 1955).

3.2.5. Les collines sublittorales

Cette unité géographique constitue dans la partie Ouest le prolongement des monts de Dahra. Elle se compose d'une série de petites collines à topographie ondulée, comportant des sommets généralement lâches et arrondis. Ces collines sont entaillées par un réseau hydrographique constitué pour l'essentiel de pas moins de trois (03) oueds importants (oued El Abid, oued Seddaoua et oued Roumman) (Zaoui, 2015).

3.1.6. La plaine des Bordjias

Elle se situe dans la partie Sud-Ouest de la zone d'étude dont elle constitue sa limite. Cette zone englobe les marais de la Macta, comme elle fait partie de la grande plaine sublittorale d'El Habra dont elle constitue le prolongement vers le Nord. Cette plaine présente un relief plat, s'élève à des altitudes de l'ordre de 40 à 50 m et les pentes y sont en général inférieures à 3 %. C'est ici le domaine de sols salins développés sur des alluvions (Boulaine, 1955).

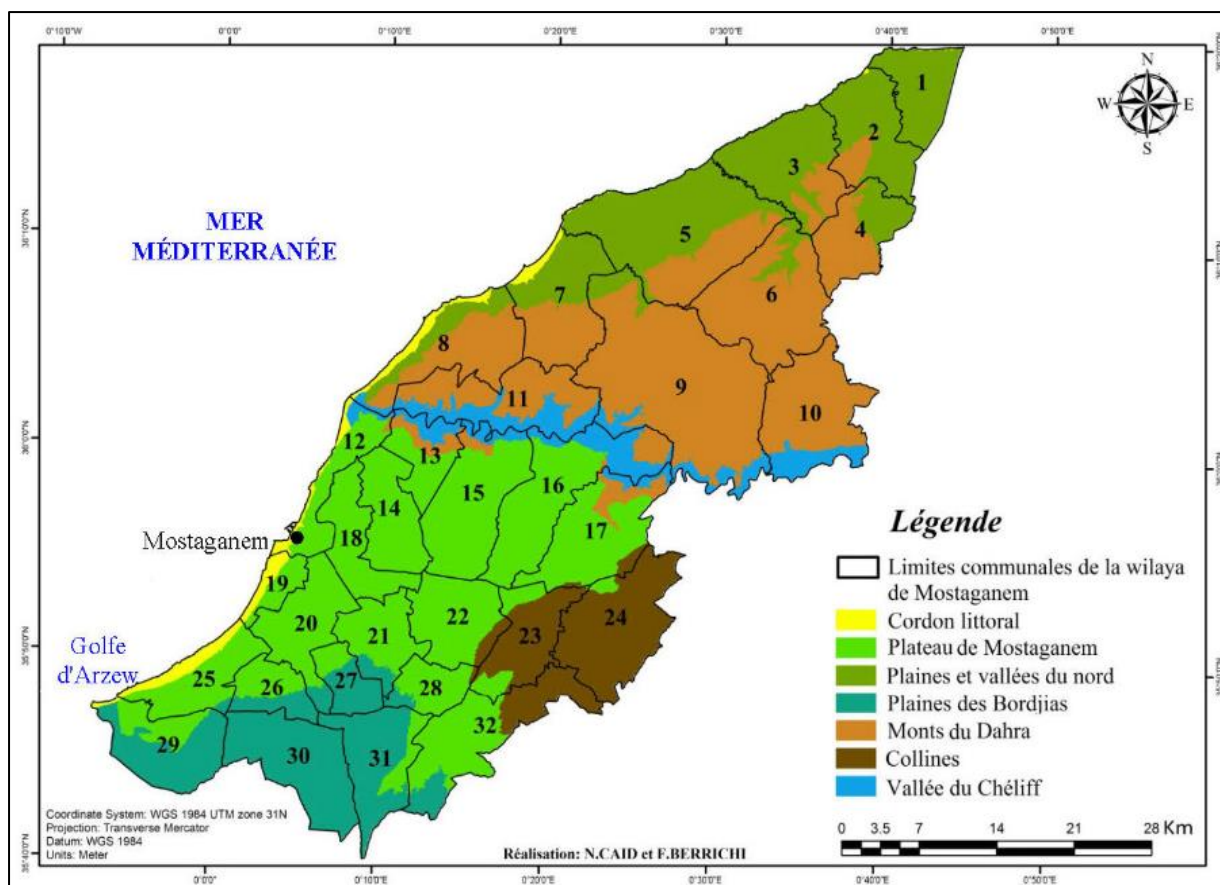


Figure 8. Unités géomorphologiques de la zone d'étude.

3.2. Les pentes

La réalisation de la carte des pentes a pour but d'illustrer une des principales caractéristiques physiques du territoire d'étude. En effet, la potentialité et les limites d'utilisation du territoire dépendent dans leur majeure partie de la pente puisque celle-ci contribue à la détermination des possibilités d'érosion en relation avec d'autres facteurs de mécanisation des cultures, des modalités d'irrigation, des possibilités de pâturage, de l'installation et le développement de la végétation de reforestation (Lopez Cadenas, 1976).

Tableau 3. Répartition des classes des pentes de la région de Mostaganem.

Classe des pentes	Superficie (km ²)	Pourcentage (%)
0 à 3 %	1772.881	78.134
3 à 6 %	408.180	17.989
6 à 12 %	67.444	2.972
12 à 21 %	20.494	0.905
Total	2269	100

La topographie de la région de Mostaganem dans leur majorité est plane car la classe des pentes inférieures à 3 % occupe environ 78 % de la superficie totale, elle représente les zones de plaines (plaine des Bordjias), des terrasses alluviales et des replats structuraux. La classe des pentes intermédiaire 3 à 6 % occupe 18 % de la zone étudiée, cette classe est relativement accentuée correspond aux piémonts, reliefs de glacis, collines (les collines sublittorales). Le reste soit 4 % du territoire ont une inclinaison très remarquable avec néanmoins une classe intermédiaire 6 à 12 % importante, correspond à des zones mixtes qui regroupent les hauts des piémonts et les montagnes, se sont le prolongement des massifs montagneux, elles sont considérées très sensibles aux phénomènes d'érosion et leurs conséquences. Ce sont généralement des terrains de parcours et des terrains forestiers (maquis et maquis clairs). Les classes où les pentes dépassent les 12 %, représentent un relief très accidenté et les escarpements rocheux comme les versants de la partie Est des monts de Dahra.

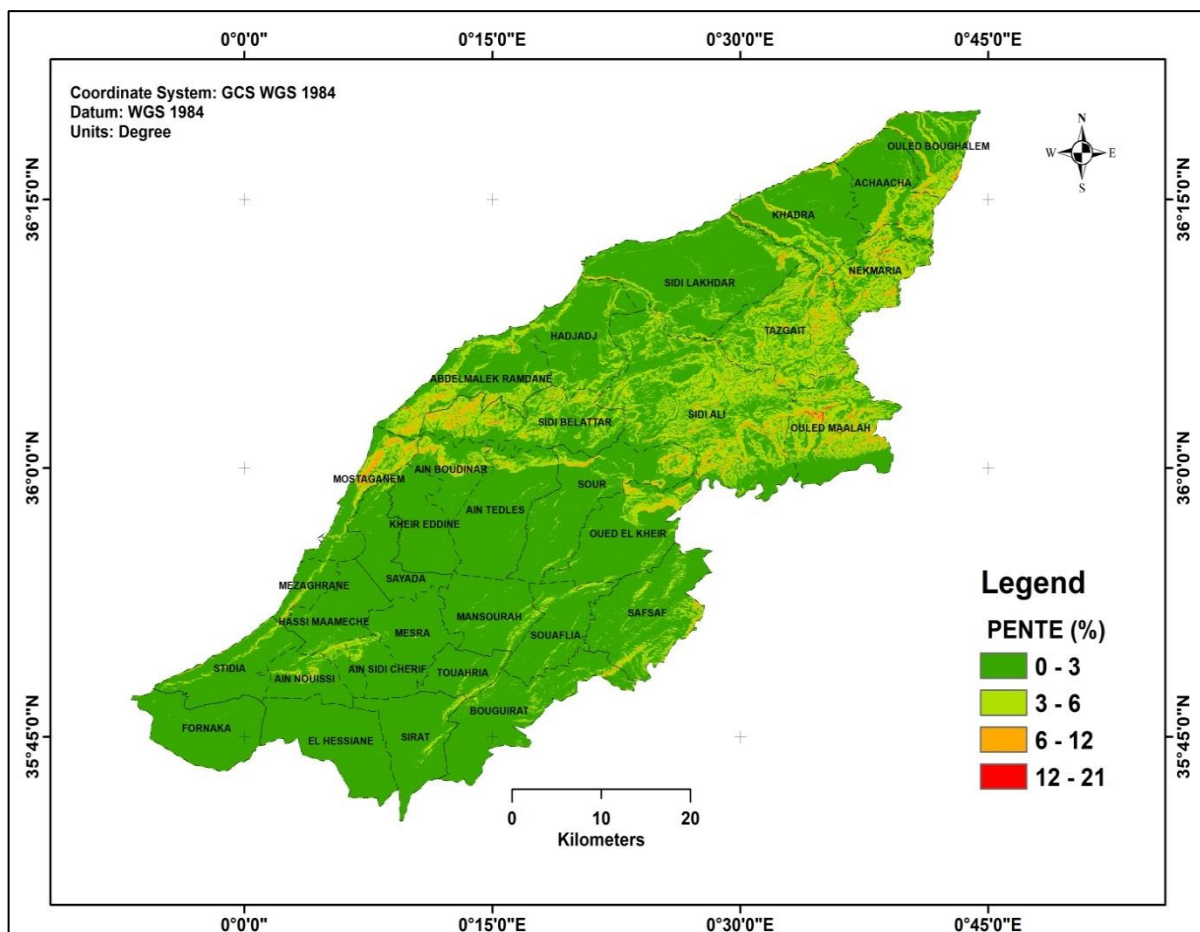


Figure 9. Carte des pentes de la région de Mostaganem.

3.3. L'exposition

Selon Ozenda, (1986) L'effet de l'exposition est particulièrement important et se traduit par la différence entre le versant Nord et le versant Sud des montagnes, ou entre les deux flancs d'une vallée lorsque celle-ci à une direction générale Est-Ouest. La présence d'une falaise exposée au Sud protège les terrains situés à son pied contre les vents du Nord, concentre la lumière et détermine un climat local sensiblement plus chaud que celui du reste de la région. La carte des orientations est élaborée par la même fonctionnalité que celle de la pente. Elle nous a permet de donner une orientation du relief par rapport au Nord. La figure suivante montre les orientations de la pente en degrés par rapport au Nord. Dans la zone d'étude l'exposition Nord domine.

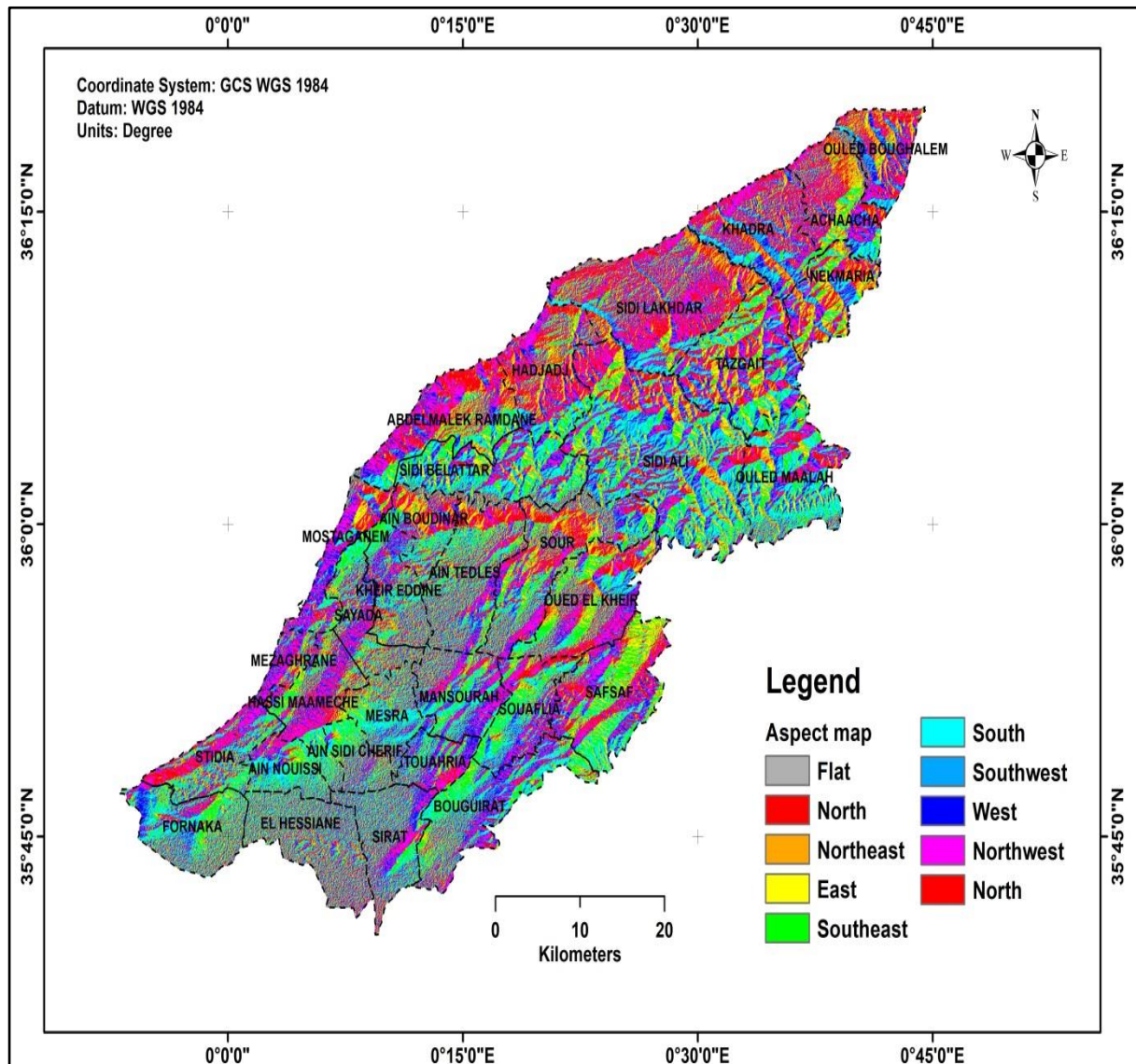


Figure 10. Carte des expositions de la région de Mostaganem.

3.4. L'altitude

La région de Mostaganem est caractérisée par différentes classes d'altitude. Ainsi, les classes d'altitudes retenues représentées comme suite :

Tableau 4. Classes d'altitude de la région Mostaganem.

Classes d'altitude (m)	Pourcentage (%)
<100	29.29
100-200	29.24
200-300	26.45
300-500	14.30
500-569	0.71
Total	100

Les classes entre 0 et 200 m sont les plus représentées, elles caractérisent 58.53 % de la superficie totale de la zone d'étude, où le relief est plat, formé de plaines (plaine des Bordjias), de vallée (La vallée du bas Chélif) et des formations dunaires mobiles ou consolidées jalonnant l'ensemble du cordon littoral. La classe d'altitude entre 200 et 500 m est la moyennement représentée avec 40.75 % de la superficie totale, elle représente la partie majeure des collines sublittorales, la partie Nord-Est du plateau et les monts de Dahra qui sont constitués d'une série de massifs et de djebels dont les plus important sont : d'Ouest en Est, les djebels Zegmoun qui culmine à 353 m, Djebel Chott (422 m), djebel Rahara (300 m), djebel Chouachi (441 m), djebel Taoussène (436 m), djebel Kirouaou (460 m) et djebel Bourzika (412 m) qui constitue la limite Est. La classe d'altitude entre 500 et 569 m est la moins représentée 0.71 % de la superficie totale, elle se localise au Nord de la région d'étude principalement dans les mots du Dahra (par exemple djebel Lakkaf 550 m) (Zaoui, 2015).

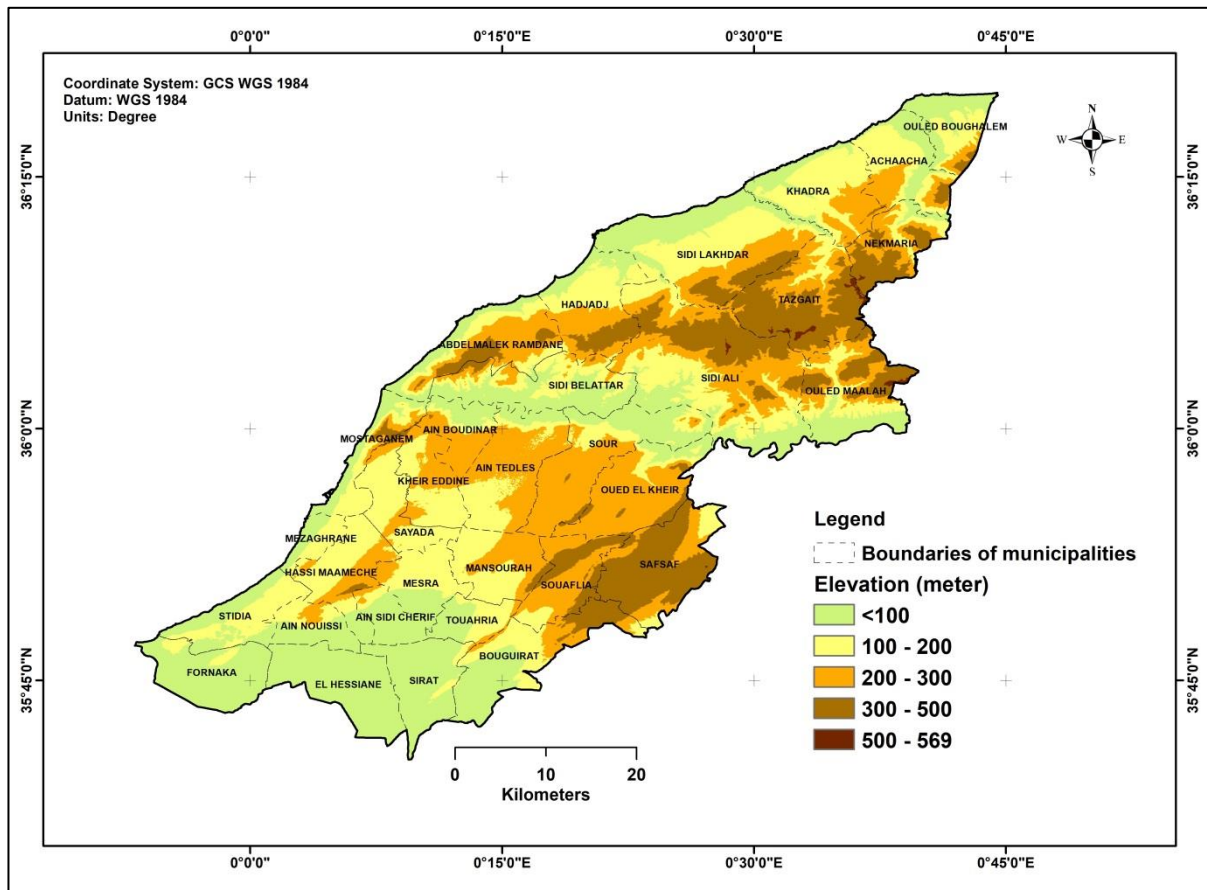


Figure 11. Carte des altitudes de la région de Mostaganem.

4. Caractéristiques géologiques

4.1. Le cordon littoral

Il est constitué de Grés calcaire du quaternaire (Calabrien) qui cède la place à proximité de la mer à des marnes bleues du tertiaire (Pliocène). C’est une bande de 10 km de largeur. Elle a été déterminée par le retrait de la mer Pliocène. L’actuel relief ne s’est déterminé qu’une fois que les déformations tectoniques estompées vers la fin du tertiaire se sont achevées. La côte est relevée, bordée par une flexure qui détermine des érosions, elle est parsemée de dunes maritimes (Zaoui, 2015).

4.2. Les monts du Dahra

Cette zone homogène est marquée par les mouvements orogéniques de l’ère tertiaire qui se rattachent au système alpin. Des dépôts se sont accumulés dans ces grands ensembles structuraux. Des déformations importantes dont résulte le relief tourmenté des monts se sont produites au contact avec des plaques africaines et ibériques. Leur histoire se poursuit encore sous forme de séismes qui affectent la vallée de Chéelif, profonde dépression les limitant au

Sud. La partie occidentale du Dahra est caractérisée par des niveaux de sérénités blanches, riches en cristaux de quartz, donnant par décomposition une bentonite plus ou moins blanche. Ils ont dressé dans la région d'Ain Zeft, une quinzaine de coupes nous citerons :

- A la base, une brèche aux brèches aux blocs anguleux pouvant atteindre 1 m^3 , devant moins grossière vers le haut (épaisseur : 10 à 15 m),
- Argiles rouges et blanches (épaisseur : 2 m),
- Grés et conglomérats, rouges à la base, et renfermant à la partie supérieure de nombreux fossiles marins,
- Marnes bleues légèrement sableuses,
- Marnes bariolées avec prédominance d'éléments rouges (d'épaisseur : 10 m) recouvertes de grés de base du Miocène supérieur.

Dans la vallée d'oued Roumane par exemple, il existe des formations continentales rouges, renfermant localement des lentilles blanches de bentonite. Cette série est recouverte par des calcaires gréseux et des marnes bleues tout à fait semblables à celle de la bordure sud du massif. Les piedmonts du Dahra sont constitués d'un ensemble recouvert d'un manteau grésosableux d'épaisseur variable. Ce manteau gréseux provient de la désagrégation des grés Pliocène (Calabrien et Astien) (BNEDER, 2009).

4.3. La vallée du Chélif

Cette vallée est drainée par le Chélif et ses affluents. Il semble que durant certains épisodes du comblement récent, les plaines du bas-Chélif étaient un vaste marécage où se sont déposées des argiles fines. Près de la mare du Chélif, les grés micacés qui surmontent les poudingues de base, renferment une belle faune de mollusques. On remarque aussi à la base de cet ensemble un niveau d'argiles rouge brique de 1 à 2 m d'épaisseur, renfermant quelques fragments anguleux de schistes créacés. Les formations conglomératiques les plus grossières ne se développent qu'au-dessus. Les éléments détritiques deviennent de moins en moins grossiers en montant dans la série ; les niveaux se développent progressivement (BNEDER, 2009).

4.4. Le plateau de Mostaganem

Au sud de la vallée du Chélif, le plateau de Mostaganem, dont le soubassement est formé de grés pliocènes à ciment calcaire, présente un relief d'aspect tabulaire dans l'ensemble de la zone centrale. Ailleurs en revanche, il est affecté par de nombreuses ondulations orientées Nord-Est, Sud-Est qui délimitent des cuvettes à fond parfois marécageux (Zaoui, 2015).

Le plateau est caractérisé par deux types de formations : les formations allochtones et les formations autochtones qui constituent la majeure partie du plateau. Les formations allochtones qui sont les terrains les plus anciens sont représentés par les diapirismes et les nappes de charriage. Les diapirismes se manifestent à l'Est de Ain Nouissy ou affleure un diapirisme de gypse renfermant des roches volcaniques, de marnes vertes ou roses de la pyrite de la dolomie du chlorure de sodium et du sulfate de Magnésium. Alors que les nappes de charriage se trouve au Nord du plateau sous plusieurs formes : flysh violacé, flysh vert, gypse du trias, marnes, argiles et grés. Les formations autochtones sont formées de terrains post nappe de Miocène. Les formations du Tertiaire sont couvertes de lumachelles pléistocènes et de matériaux sableux (produits d'altération et remaniements éoliens) (Boulaine, 1955).

4.5. Les collines sublittorales

Elles se situent au sud Est du plateau de Mostaganem, présentant un relief moins important que celui des Monts de Dahra. Elles renferment une lithologie où prédominent des formations avec alternances de roches tendres. Le réseau hydrographique est beaucoup moins dense que celui des monts de Dahra. Elles résultent du plissement des dépôts du Néogène du bassin du bas-Chélif au cours du pléistocène, cette orogénèse tardive a permis, malgré la grande plasticité du matériel Néogène, la formation des reliefs. Cette Zone montagneuse particulièrement développée à l'Est vient s'accoler au massif crétacé du Dahra pour former un même ensemble orographique (BNEDER, 2009).

4.6. La plaine des Bordjias

Cette zone est située dans la partie instable du bassin miocène Nord-Tellien. Elle est formée par des alluvions sablonneux (Mesra, Mansourah et Touahria), et des carapaces calcaires (zone Ain Sidi Cherif) du quaternaire (Boulaine, 1955). L'étude géologique de la plaine des Bordjias a mis en évidence une structure constituée par un quaternaire représenté à sa base par une formation lumachellique transgressive sur les terrains sous-jacents d'épaisseur comprise entre 15 et 20 m attribuée au Calabrien. Cette formation est surmontée par un Post-villafranchien caractérisé par des dépôts d'argiles ou des carapaces calcaires et des sables limoneux. La zone est distinguée par des formations d'alluvions. Il s'agit de formations déposées par les petits oueds qui coulent dans cette zone. La texture variable de ces alluvions est sous la dépendance de la lithologie de l'avant pays drainé vers la plaine, provenant de la désagrégation des grés pliocènes (sables du plateau de Mostaganem). Ces dépôts sont localisés dans la zone de Mesra, Mansourah et de Touahria au pied des monts d'Ennaro,

Zaimia et de Beiod à l'Est de la zone d'étude. Dans les zones basses (zone d'Ain Sidi Cherif), les alluvions deviennent plus argileuses ; les sols sont de texture moyenne à fine ou ils présentent un encroûtement calcaire dur en profondeur ou présentant une accumulation de calcaire sous forme de nodules ou d'amas apparaissant vers 60cm de profondeur (Boulaine, 1955).

5. Caractéristiques hydrologiques

5.1. Réseau hydrographique

La longueur du réseau hydrographique au sein de la région de Mostaganem s'élève à 1893.32 Km, dont entres, 353.88 Km d'Oued permanent (Oued Chellif) et 1539.44 Km d'Oueds temporaires. La figure suivante illustre la carte du réseau hydrographique de la région de Mostaganem.

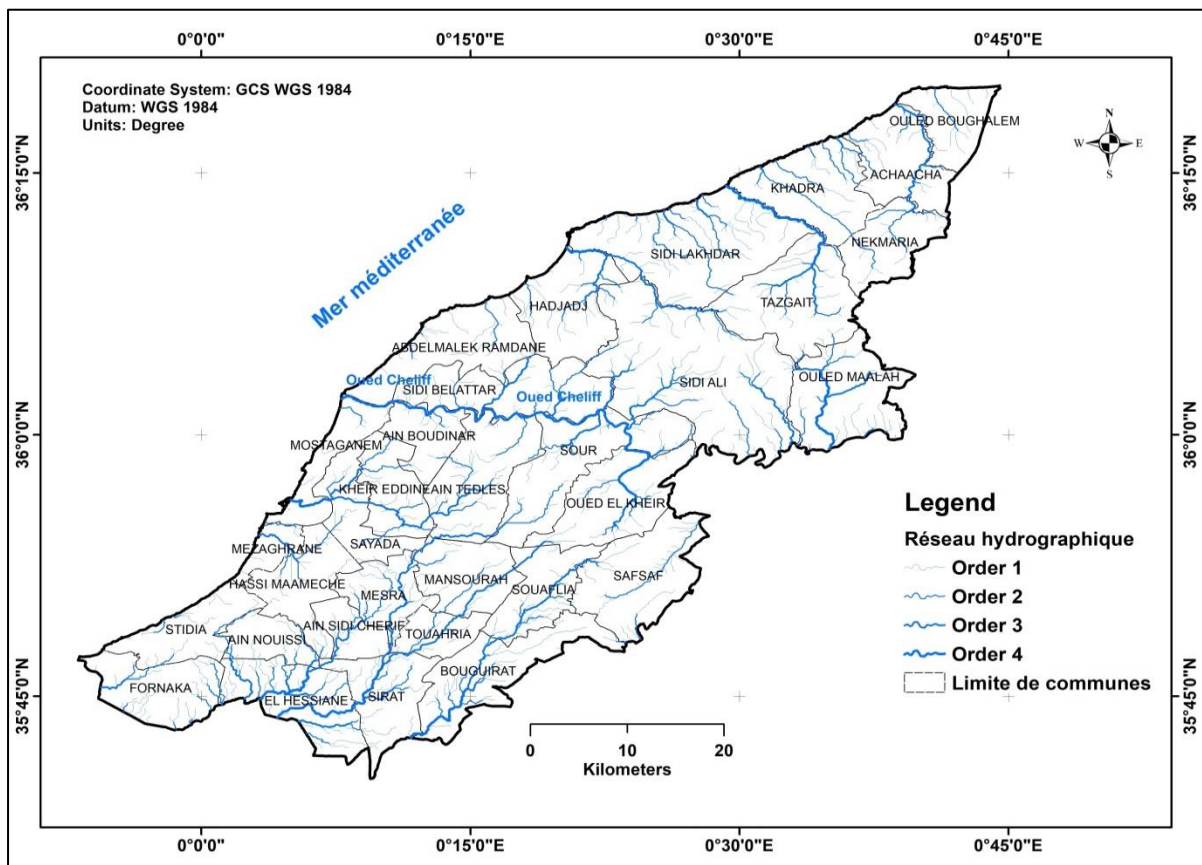


Figure 12. Carte du réseau hydrographique de la région de Mostaganem.

5.2. Ressources en eau superficielles

5.2.1. Barrages

La région de Mostaganem compte 03 barrages en exploitation, d'une capacité totale de 165.38 hm³ et un volume régularisé de 137 hm³/an.

Tableau 5. Les barrages en exploitation au niveau de la région de Mostaganem.

Barrages	Capacité en millions m ³	Volume actuel en millions m ³	Volume utile de la retenue hm ³	Utilisation
Kramis	45	24.04	25	AEP-Irrigation
Chellif	50	41.68	30	AEP
Kerrada	70	63.90	60	AEP

(DREW, 2021)

5.2.2. Retenues collinaires

Les retenues collinaires recensées dans la région de Mostaganem sont au nombre de 15 dont 03 en exploitation d'une capacité totale de 0.90 hm³ destinée à l'irrigation de la PMH. Alors que les douze (12) autres retenues sont complètement envasées. Une seule retenue collinaire est en cours de construction (Oued Benhassen) avec une capacité de 0.25 hm³. Huit (08) autres retenues collinaires et petits barrages en étude d'une capacité totale de 16 hm³ sont destinées à l'irrigation (DREW, 2021).

5.3. Ressources en eau souterraines

La région de Mostaganem compte 76 forages dont 69 forages pour l'AEP et 07 forages pour l'irrigation, 8565 puits et 29 sources (DREW, 2021). Les eaux souterraines font partie des ressources conventionnelles, mais avec la mise en service du système MAO et l'arrivée des eaux du dessalement cette ressource ne représente actuellement que 5% de la production totale des eaux potables de la région (DREW, 2021).

5.4. Ressources en eau non conventionnelles

5.4.1. Eaux de dessalement

La station de dessalement de Mostaganem est implantée dans la zone de Sonachter à l'Est de la ville de Mostaganem d'une capacité de production théorique de 200 000 m³/jour, et une

production réel actuelle de 145 000 m³/jour. Elle est entrée en production au mois de novembre 2011, en application d'un programme de production et de livraison de l'eau potable.

5.4.2. Eaux usées épurées

Actuellement, il existe cinq (05) stations d'épuration en exploitation dans la région de Mostaganem avec une capacité totale de 106 000 (Eqh) et épurent un volume d'eau annuel de 8.1 hm³. Une (01) station en cours de réalisation à Salamandre avec une capacité de 350 000 (Eqh) et un volume d'eau annuel de 18.25 hm³ et sept (07) stations sont en phase d'étude avec une capacité totale de 275 000 (Eqh) et un volume d'eau épuré annuel de 70 hm³ (DREW, 2021).

6. Agriculture

La région de Mostaganem est notablement a vocation agricole, c'est le secteur le plus pourvoyeur d'emplois permanent et saisonniers. Du point de vue agricole, elle se répartit en 03 zones, zone de montagne : 51 286 ha soit 38.77 % de la SAU, zone de piémont : 13 488 ha soit 10.19 % de la SAU et zone de plaine : 67 494 ha soit 51.78 % de la SAU. La superficie agricole totale (SAT) est de 177 310 ha dont 132 268 ha sont des sols utiles (SAU) soit 32 960 ha en irrigué et 5 110 ha sont des parcours (DSA, 2022).

6.1. Production végétale

Les céréales occupent la première place, viennent ensuite les cultures maraichères, le reste est répartis entre l'arboriculture et la viticulture.

Tableau 6. Répartition de la superficie agricole utile de la zone d'étude (ha) (DSA, 2022).

Grandes Cultures			Maraichage	Arboricultures				Viticulture
Céréales	Fourrages	Légumes secs		noyaux pépins	Agrumes	Oliviers	Rustique	
50290	16035	5 853	26 158	6845	4702	6779	1703	11211

6.2. Production animale

L'activité agricole et de l'élevage sont les leviers principaux de développement local créateur d'emplois dans la zone d'étude. L'élevage est devenu au fil des années une activité qui structure la zone d'étude. La production animale varie d'une commune à une autre, et d'une saison à une autre, selon les conditions pluviométriques locales et leurs conséquences sur le

couvert végétal. L'élevage ovin reste dominant dans la zone avec 80 %, vient ensuite de l'élevage bovin 11 % et l'élevage caprins 07 %.

Tableau 7. Capacités de la production animale.

Gros élevage (têtes)			Petit élevage (sujets)		Apiculture (ruches)	Equins (têtes)
Ovins	Bovins	Caprins	Poules chaires	Poules pondeuses		
206600	26800	18080	2926090	1793410	18400	12000

(DSA, 2022)

Durant ces dernières années, l'apiculture occupe une place importante dans la production animale dans la zone d'étude. Cette activité apicole est suite à l'attitude des pratiques de la population locale sous ses différents volets peut constituer un levier de développement durable de cet espace rural qui recèle des potentialités naturelles en matière de ressources phyto-génétiques. Le tableau suivant (tableau 8) représente l'évolution de la production agricole durant ces trois dernières années (DSA, 2022).

Tableau 8. Evolution de la production agricole de trois dernières années.

Filière (q)	2019	2020	2021
Céréales	483712	1012837	1025146
Fourrages	331405	473830	476416
Légumes secs	24685	37142	50307
Tomate industrielle	72565	103680	110200
Maraîchage	5581113	6436205	7240577
Viticulture	92016	363409	420344
Oléiculture	118211	96700	110128
Agrumes	1086808	1100528	1118300
Noyaux Pépins	634096	676259	686846
Viandes rouges	46874	45333	50303
Viandes blanches	60458	57029	69055
Miel	815	847	1126

(DSA, 2022)

7. Caractérisation générale des formations forestières de la région de Mostaganem

7.1. Importance des terres forestières

Les formations forestières (forêt, maquis et reboisement) occupent une superficie de 27451 ha répartie en 09 forêts domaniales correspondant à un taux de boisement estimé à 11 %. Ce taux de boisement est insuffisant, ceci d'autant plus que les formations forestières sont en grande partie dégradées à l'état de maquis et maquis arborés (CFM, 2021)

Tableau 9. Les formations forestières de la région de Mostaganem.

Formation forestière	Superficies (ha)	Taux %
Forêt proprement dites	15900	58 %
Maquis	6546	24 %
Maquis arborés	2044	07 %
Reboisement	2961	11 %
Total	27451	100%

(CFM, 2021)

7.2. Localisation

Les formations forestières (Forêt, maquis et reboisement) sont situées au niveau des sous zones suivantes:

- Forêts de littoral Est ;
- Djebel Zaimia et Ennaro ;
- Forêt de littoral Ouest ;
- Monts du Dahra ;
- Plateau de Mostaganem.

7.3. Répartition par essence

En ce qui concerne les essences forestières, les formations de pin d'Alep pures sont largement dominantes et occupent une superficie de 10 657 ha soit environ 39 % du massif forestier. Les autres essences forestières de moindre importance sont l'eucalyptus et le pin pignon.

- Pin d'Alep et eucalyptus en mélange : 4 189 ha (15 %) ;
- Eucalyptus pur et en mélange : 2 519 ha (9 %) ;
- Pin pignon : 407 ha (1 %) ;
- Reboisements mélangés d'essences diverses : 937 ha (3 %) (CFM, 2021).

7.4. Types des formations forestières

Les maquis et maquis arborés occupent une superficie de 8 590 ha soit 31 % des superficies forestières totales de la zone d'étude. Ces formations sont réparties en :

- Maquis denses : 3 262 ha (38 %)
- Maquis clairs : 3 284 ha (38 %)
- Maquis arborés de Pin d'Alep : 1 843 ha (21 %)
- Maquis arborés d'Eucalyptus : 140 ha (2 %)
- Maquis arborés de pin d'Alep et Eucalyptus mélangés : 61ha (01 %).
- Les espèces du maquis sont le thuya, le chêne vert, le genévrier de Phénicie

Les peuplements de pin d'Alep qui occupent une superficie de 10 809 ha sont répartis en peuplements naturels : 8 281 ha (77 %) et en reboisements : 2 528 ha (23 %), qui sont essentiellement jeunes et on bon état de végétation :

Naturels :

- Vieille futaie dense : 431 ha (5 %) ;
- Jeune futaie dense : 2 511 ha (30 %) ;
- Jeune futaie claire : 3 183 ha (38 %) ;
- Perchis clairs : 932 ha (11 %) ;
- Perchis dense : 1 108 ha (13 %) ;
- Fourré dense : 116 ha (1 %) (CFM, 2021).

Reboisements :

- Gaulis : 472 ha qui sont répartis à travers la forêt communale (Versant Nord du bas Cheliff) et la forêt de Bourahma (Forêts littorales Est) ;
- Perchis : 1 761 ha dont 70 % sont localisés au niveau des forêts communales de la sous zone (Monts du Dahra) ;
- Jeunes futaies : 295 ha dont 12% sont situées au niveau de la forêt de la Macta (Sous zone homogène forêts littorales Ouest).

Les peuplements de pin d'Alep en mélange avec l'eucalyptus sont très répandus au niveau des forêts de la région de Mostaganem puisqu'ils constituent 15 % des formations forestières. Ce sont également de jeunes formations, le plus souvent denses et généralement bien venantes répartis comme suit :

- Perchis denses : 2 084 ha dont 59 % sont situés dans la forêt de seddaoua (Forêts littorales est)

- Jeunes futaies denses : 199 ha dont environ 50 % sont localisées dans les forêts de Bourahma et Seddaoua (Forêts littorales est).

- Jeunes futaies claires : 230 ha

- Reboisement au stade Gaulis : 488 ha (forêts communales, versant nord du bas Cheliff)

Les jeunes peuplements d'Eucalyptus occupent une superficie de 2 519 ha repartis-en :

- Jeunes futaies denses : 1 766 ha dont 88% sont concentrés dans les seules forêts de Zerrifa et de Bourahma au niveau des forêts littorales est.

- Jeunes futaies claires : 753 ha dont 56 % de ces formations sont situées au niveau de la forêt de Bouguirat et Akboub (Dj.Zaumia et Ennaro).

Les reboisements formés d'essences mélangées (Pin pignon, Eucalyptus et Acacia) au stade de jeune futaie claire sur 28 ha localisés au niveau de la forêt de Macta et Stidia (sous zone homogène forêts littorales).

Les Reboisements de Pin pignon occupent 407 ha (Akboub, Ain Brahim, Bouachria, Stidia, Bourahma et Chouachi) (CFM, 2021).

8. Caractéristiques climatiques

L'Algérie, qui est un pays soumis à l'influence conjuguée de la mer, du relief et de l'altitude, cet immense territoire déjà subdivisé en plusieurs ensembles contrastés qui présentent également diverses nuances internes, ce qui complique les études traitant des facteurs climatiques. Plusieurs études analytiques et synthétiques, notamment Seltzer (1946) ; Bagnouls et Gaussen (1953) ; Le Houerou (1995), montrent que le climat algérien est de type méditerranéen, caractérisé par une saison sèche et chaude : saison estivale, et une saison froide et pluvieuse : saison hivernale.

En Algérie, les ressources hydriques tributaires pour une large part d'une pluviométrie très irrégulière et inégalement répartie dans l'espace, demeurent modestes, eu égard également au déficit en moyens de rétention (barrages, retenues collinaires etc.). Les changements climatiques et en particulier la sécheresse qui sévit ces dernières années, essentiellement à l'Ouest du pays et en particulier la région de Mostaganem, exacerbe davantage le problème.

Par le biais de ce travail nous allons essayer de faire ressortir les variations des facteurs climatiques au niveau de la région de Mostaganem.

Pour réaliser ce présent travail, nous avons utilisé les données récoltées au niveau de la station météorologique de Mostaganem (nouvelle période) qui se rapportent à la période allant de 1980-2020, soit 40 années d'observation et celles de l'ancienne période qui ont été obtenues à

partir de recueil météorologique de Seltzer (1946) pour une période de 25 ans allant de 1913 au 1938.

Tableau 10. Coordonnées de la station météorologique de Mostaganem.

Caractéristique de station	Altitude	Latitude	Longitude
Mostaganem	137	35°53N	00°07E

8.1. Etude des paramètres climatiques

Pour mieux appréhender le bioclimat de la zone d'étude deux paramètres essentiels sont pris en considération, à savoir les précipitations et la température. La pluie et la température sont la charnière du climat (Bary-Lenger et al., 1979). Selon Kadik (1983), ces paramètres varient en fonction de l'altitude, de l'orientation des chaînes de montagnes et de l'exposition.

8.1.1. Précipitations

La pluviométrie est un élément fondamental du climat. Son importance est telle que les différentes classifications du climat reposent essentiellement sur la moyenne annuelle ou mensuelle des précipitations, en combinaison avec les moyennes et /ou les extrêmes de température. Djebaili (1978), définit la pluviosité comme étant le facteur primordial qui permet de déterminer le type de climat. En effet, celle-ci conditionne le maintien et la répartition du tapis végétal d'une part, et la dégradation du milieu naturel par le phénomène d'érosion d'autre part ; notamment, au début du printemps. Pour Belgat (2001), l'intensité des pluies et leurs fréquences jouent un rôle prépondérant sur :

- la stabilité ou l'instabilité des sols, combinés aux facteurs physiques du sol, elles peuvent favoriser ou défavoriser la stabilité structurale du sol ;
- elles agissent sur la solubilité et la migration des nutriments dans le sol ;
- en conséquence elles participent à la répartition spatiale des espèces ;
- elles accélèrent ou elles bloquent l'évolution des matériaux organiques et minéraux, et elles interviennent dans la formation des sols.

Tableau 11. La pluviométrie moyenne.

Périodes	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
1913-1938	65.7	59.6	38.4	36	25	5.9	4	1.7	21.5	41.9	54.5	61.6	415.8
1980-2020	59	48	36.8	34	19.5	8	5	3.2	16	33	43.5	56.5	362.5

La région de Mostaganem reçoit une moyenne de 415.8 mm/an (ancienne période) et 362.5 mm/an (nouvelle période), pour les deux périodes les pluies sont concentrées durant la saison froide, et plus qu'on s'en va vers la saison sèche la pluviométrie diminue brusquement. Le mois le plus pluvieux reste le mois de Janvier avec une moyenne de 65.7 mm pour l'ancienne période et 59 mm pour la nouvelle période par contre le mois qui enregistre la faible quantité de pluie c'est le mois de Juillet (4 et 5 mm) pour les deux périodes respectivement.

8.1.2. Régimes saisonniers

La connaissance de la moyenne annuelle de la pluie est d'un grand intérêt, mais pour compléter les études de la distribution de la pluie, il faut y ajouter celle du régime pluviométrique, c'est à dire la manière dont cette quantité totale de pluie se répartit entre les différentes saisons (Angot, 1916). Selon Halimi (1980), les régimes pluviométriques se trouvent sous l'influence de deux groupes de facteurs :

- les facteurs géographiques : altitude, latitude, distance à la mer, orientation des versants.
- les facteurs météorologiques : masses d'air, centre d'action, trajectoire des dépressions.

Définie par Musset in Chaâbane (1993), la méthode consiste à un aménagement des saisons par ordre décroissant de pluviosité.

$$\text{Crs} = \text{Ps} \times 4/\text{Pa}$$

Ps : précipitations saisonnières ;

Pa : précipitations annuelles ;

Crs : Coefficient relatif saisonnier de Musset.

Tableau 12. Régime et coefficient relatif saisonnier de Musset.

Saisons Période	Hiver (H)		Printemps (P)		Eté (E)		Automne (A)		Pa (mm)	Type
	Ps (mm)	Crs	Ps (mm)	Crs	Ps (mm)	Crs	Ps (mm)	Crs		
1913-1938	186.9	1.79	99.4	0.95	11.6	0.11	117.9	1.13	415.8	HAPE
1980-2020	163.5	1.80	90.3	0.99	16.2	0.17	92.5	1.02	362.5	

A partir des données capitalisées dans le tableau précédant on peut constater que le régime saisonnier est le même pendant l'ancienne et la nouvelle période, ce régime est de type HAPE, l'hiver est la saison la plus arrosée, par contre la saison d'été est caractérisée par des pluies faibles.

8.1.3. Les températures

La température est le second facteur constitutif du climat influant sur le développement de la végétation. Les températures moyennes annuelles ont une influence considérable sur l'aridité du climat. Ce sont les températures extrêmes plus que les moyennes qui ont une influence sur la végétation, sauf si elles sont exceptionnelles et de courte durée (Greco, 1966).

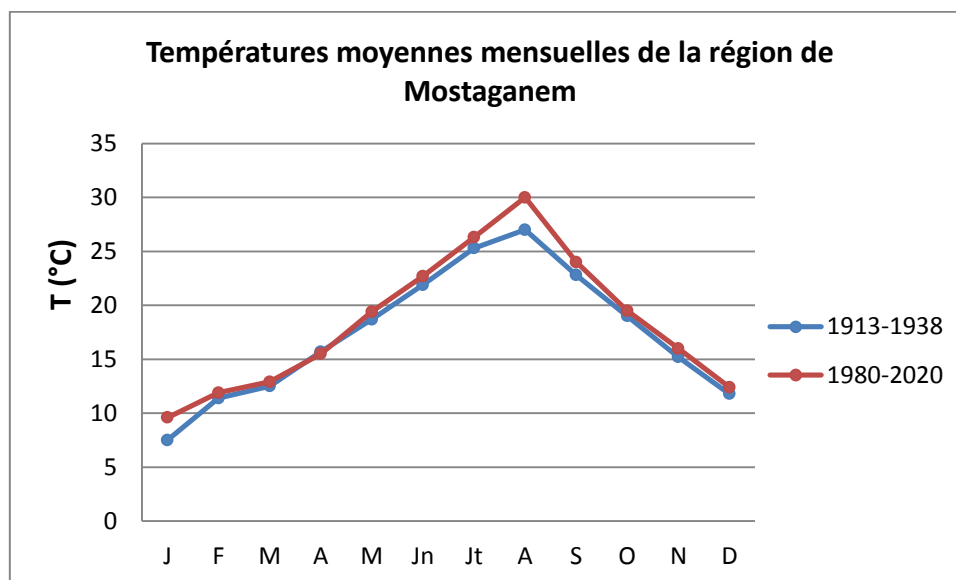


Figure 13. Variation des températures moyennes mensuelles de la région de Mostaganem.

La variation des températures moyennes enregistrées durant les deux périodes, montre que la température au sein de la zone d'étude commence à baisser à partir du mois de Décembre pour atteindre la température la plus faible en Janvier et puis remonte pour atteindre la température la plus élevée au mois d'Aout. Les températures les plus basses se produisent généralement au mois de Janvier et Février. Les températures les plus élevées se produisent au mois de Juillet et Août.

8.2. Aspect bioclimatique

L'étude des températures et des précipitations fournit un bon aperçu sur le climat régional. La combinaison de ces paramètres climatiques ont permis aux nombreux auteurs la mise au point de plusieurs indices qui rendent compte du climat et de la végétation existante, notamment l'indice de De Martonne, la classification de Debrach, le diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gausson, L'indice xérothermique et le Quotient pluviothermique d'Emberger.

8.2.1. Indice d'aridité de De Martonne

De Martonne (1926), a défini l'aridité du climat par le quotient :

$$I = P / (T + 10)$$

P : Pluviométrie moyenne annuelle (mm) ;

T : Température moyenne annuelle (°C).

De Martonne a donné un abaque où six climats sont définis en fonction des précipitations moyennes et des températures moyennes. Ces zones sont :

A : Zone à écoulement abondant.

B : Zone à écoulement exoréique.

C : Zone tempérée, drainage extérieur, irrigation non indispensable.

D : Régime semi-aride, écoulements temporaires, formations herbacées.

E : Régime désertique, écoulements temporaires, drainage intérieur- exoréique.

F : Hyperaridité, aréisme.

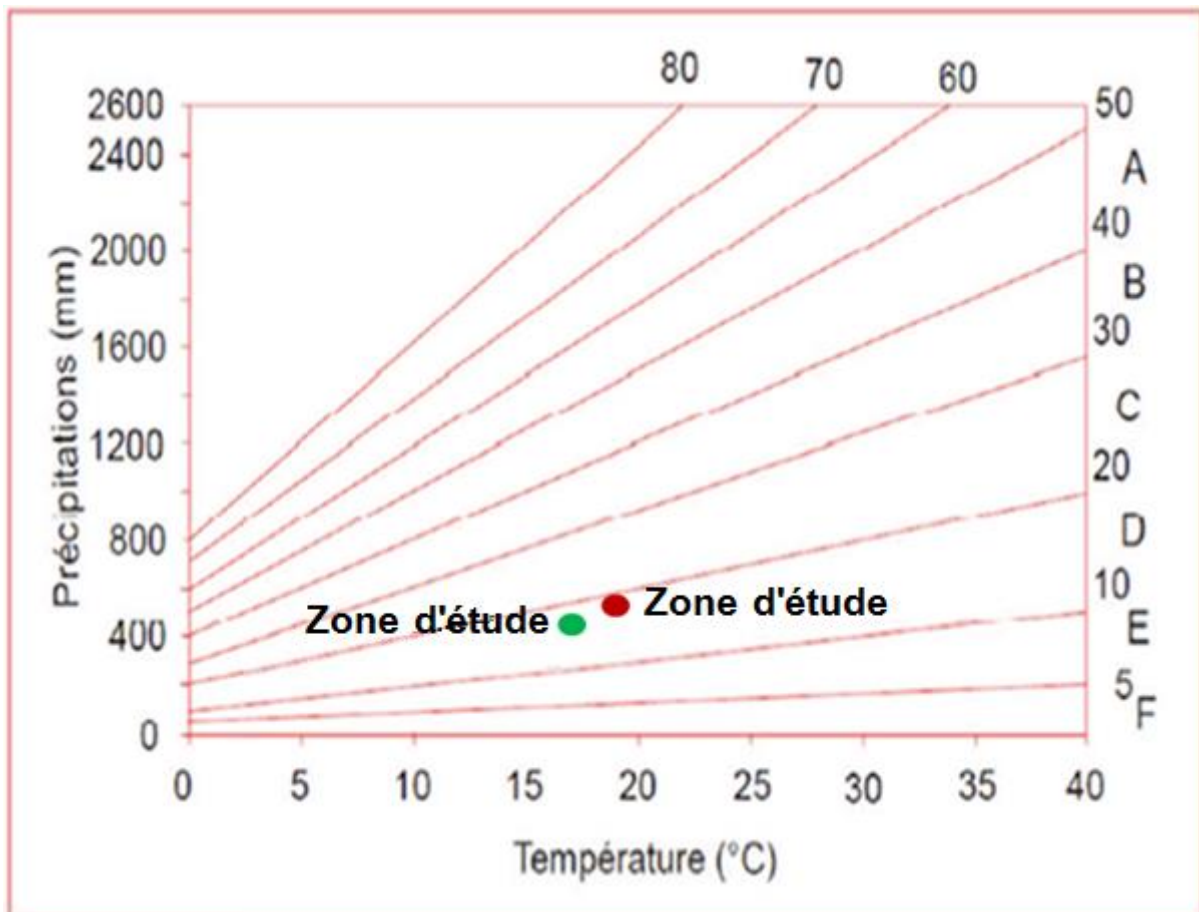


Figure 14. Indice d'aridité de De Martonne.

Le tableau 11 et la figure 14 donnent une précipitation moyenne annuelle de P = 415.8 mm pour l'ancienne période et 362.5 mm pour la nouvelle période et une température moyenne

annuelle de $T = 17.4^{\circ}\text{C}$ et $T = 18.35^{\circ}\text{C}$ pour les deux périodes ancienne et nouvelle respectivement, ces résultats sont utilisés pour la détermination de l'indice d'aridité de De Martonne $I = 15.17$ (ancienne période) et $I = 19.75$ (nouvelle période). Cet indice place notre zone d'étude où le climat est qualifié de semi-aride avec des écoulements temporaires.

8.2.2. Indice de continentalité ou amplitude thermique

L'amplitude thermique est calculée selon la méthode de Debrach (1953). Cette méthode nous a permis de définir les différents types de climat :

- Climat insulaire caractérisé par un écart de $M - m < 15^{\circ}\text{C}$
- Climat littoral caractérisé par un écart compris entre $15^{\circ}\text{C} < M - m < 25^{\circ}\text{C}$
- Climat semi-continentale $25^{\circ}\text{C} < M - m < 35^{\circ}\text{C}$
- Climat continental $M - m > 35^{\circ}\text{C}$

Tableau 13. Indice de continentalité ou amplitude thermique.

Période	M - m ($^{\circ}\text{C}$)	Type de climat
1913-1938	19.5	Climat littoral
1980-2020	20.4	

8.2.3. Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen

Selon Bagnouls et Gaussen (1953), un mois est dit biologiquement sec si, "le total mensuel des précipitations exprimées en millimètres est égal ou inférieur au double de la température moyenne, exprimée en degrés centigrades", cette formule ($P \leq 2T$) permet de construire des diagrammes ombrothermiques traduisant la durée de la saison sèche d'après les intersections des deux courbes.

- P : Précipitations moyenne du mois en (mm) ;
- T : température moyenne du mois en ($^{\circ}\text{C}$).

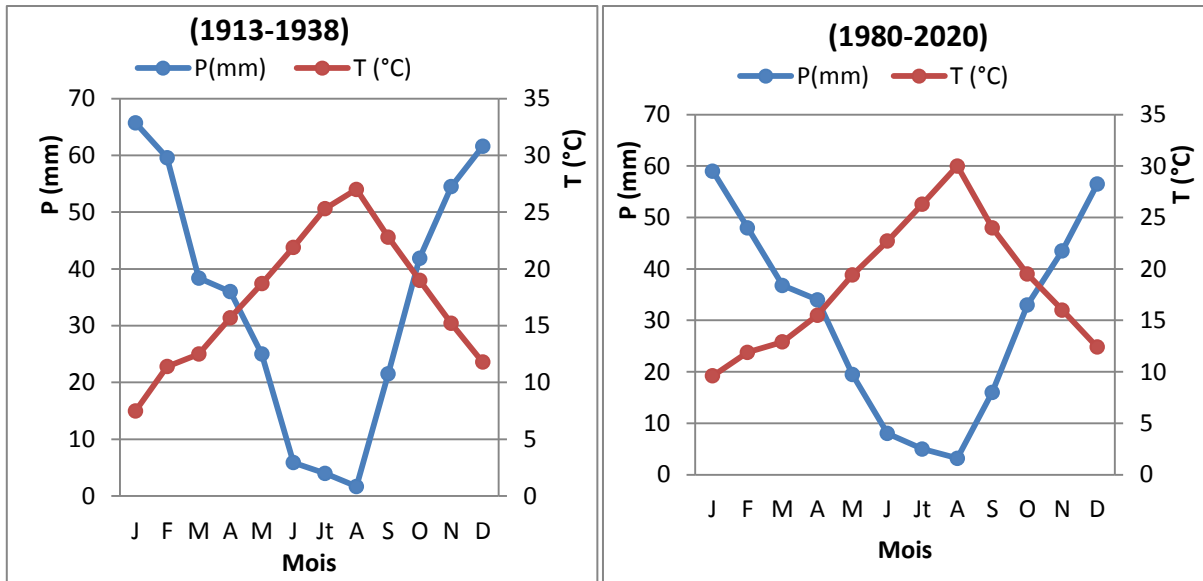


Figure 15. Diagramme Ombrothermique de Bagnouls et Gausсен (Mostaganem).

L'interprétation de diagramme ombrothermique de notre zone d'étude montre que la saison sèche débute le mois d'Avril et se prolonge jusqu'à le mois d'Octobre avec une durée de 6 mois pour les deux périodes. En outre, la saison humide s'étale le reste de l'année.

8.2.4. Indice xérothermique d'Emberger

Selon Daget et Davide (1982), la "sécheresse estivale" est le premier caractère discriminant de la méditerranéité, et qu'elle s'exprime utilement à l'aide de l'indice d'Emberger :

$$I_{se} = P_e / M$$

Où (Pe) représente la somme des précipitations moyennes estivales et (M) la moyenne des températures maximales de la période estivale.

Tableau 14. Indice xérothermique d'Emberger.

Période	Pe	M	Ise
1913-1938	11.6	24.73	0.46
1980-2020	16.2	26.33	0.61

Les faibles valeurs d'indice xérothermique qui caractérisent le climat de la zone d'étude pendant les deux périodes confirment la rareté des pluies, les fortes chaleurs ainsi que l'étendue de la saison sèche.

8.2.5. Quotient pluviométrique d'Emberger

L'indice d'Emberger prend en compte les précipitations annuelles, la moyenne des maxima de température du mois le plus chaud et la moyenne des minima de température du mois le plus froid (Emberger, 1955).

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

Avec :

Q_2 : Quotient pluviométrique ;

P : Précipitation annuelle en (mm) ;

M : Moyenne des températures maximales du mois le plus chaud exprimée en (°k) ;

m : Moyenne des températures minimales du mois le plus froid exprimée en (°k).

Tableau 15. Quotient pluviométrique d'Emberger.

Période	P (mm)	M		m		Q2	Etage bioclimatique
		(°C)	(°K)	(°C)	(°K)		
1913-1938	415.8	27	300.15	7.5	280.65	73.42	Semi-aride à hiver chaud
1980-2020	362.5	30	303.15	9.6	282.75	60.65	

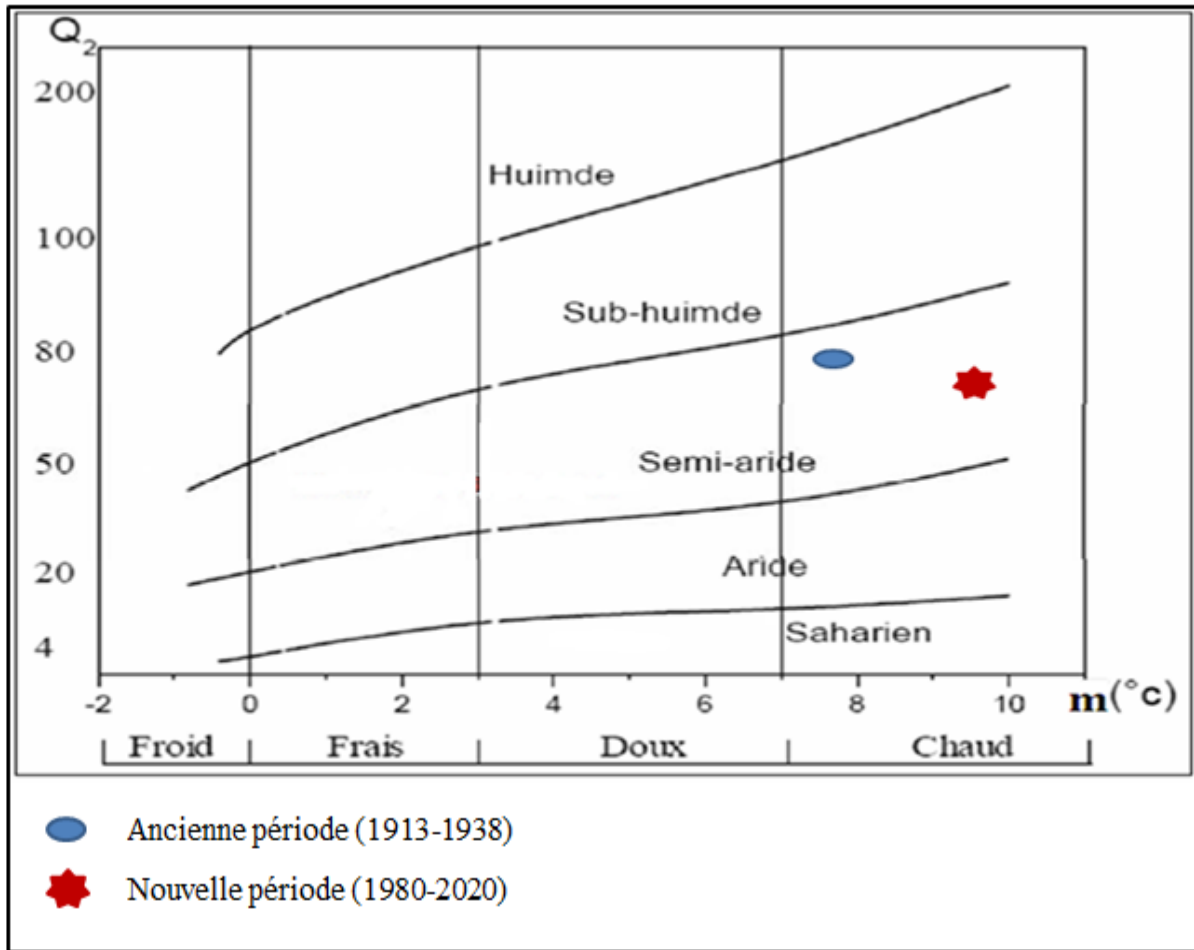


Figure 16. Place de la zone d'étude dans le Climagramme de L. Emberger.

8.2.6. Synthèse bioclimatique

A la lumière des résultats obtenus en utilisant les différents données climatiques et indices bioclimatiques, le type de climat dans notre zone d'étude est méditerranéen appartenant à l'étage bioclimatique semi-aride à un hiver chaud caractérisé par des écoulements temporaires, avec des précipitations irrégulières (régime saisonnier du type HAPE) et faibles (415.8mm/an) l'ancienne période et (362.5mm/an) pour la nouvelle période. On y distingue deux périodes contrastées, une période humide et froide, l'autre sèche et chaude. Les précipitations estivales sont souvent des pluies torrentielles et les températures présentent des amplitudes plus ou moins importantes (climat littoral $15^{\circ}\text{C} < M - m < 25^{\circ}\text{C}$). Les mois de Janvier et Février sont les mois les plus froids durant toute l'année et les mois de Juillet et Août sont les mois les plus chauds pour les deux périodes. La saison sèche débute généralement en Avril et se prolonge à Octobre (période critique pour la végétation).

Chapitre IV

Materiel et Methodes

1. Introduction

L'étude du potentiel de production ou la productivité des peuplements forestiers constitue une source d'information fondamentale et indispensable pour la prise de décision en matière d'aménagement ou de gestion des peuplements forestiers.

L'évaluation et l'estimation de ce potentiel de production ont toujours fait appel à des méthodes directes et indirectes ou encore mixtes, interagissant plusieurs critères d'ordre dendrométrique, écologique et anthropique.

Généralement, les méthodes d'estimations subdivisent en trois types : une méthode dendrométrique directe ou le critère de productivité concerne la production totale de matière ligneuse, soit le volume total soit l'accroissement moyen annuel en volume ; une méthode dendrométrique indirecte, dans ce cas, le critère de productivité est défini par une caractéristique dendrométrique en liaison étroite avec la production totale en volume (la hauteur dominante par exemple) et enfin une méthode mixte qui s'appuie sur la combinaison entre les caractéristiques dendrométriques et les diverses variables du milieu (topographie, sol, phytoécologie.... etc).

Dans le but d'une meilleure connaissance du potentiel de production des peuplements de pin pignon (*Pinus pinea* L) dans l'Ouest algérien et l'identification de certains facteurs pouvant avoir une influence sur la productivité de cette essence, nous avons élaboré cette étude, dont l'objectif principal est d'évaluer et d'estimer de manière fiable les potentialités réelles qu'offre le pin pignon dans la région de Mostaganem particulièrement et de préciser les relations entre cette production et les facteurs écologiques qui l'influencent.

Dans une optique, afin de prévoir la croissance des peuplements étudiés, et d'apprécier la productivité de l'espèce, nous avons établi un modèle de croissance en hauteur dominante comme indice de fertilité. Partant du principe que la hauteur dominante est en relation avec la production totale en volume pour une station donnée.

Finalement, la production de cônes et de graines a été étudiée en fonction des différents paramètres dendrométriques (âge, diamètre de houppier, densité...) et les facteurs écologiques (profondeur du sol, altitude...). L'évaluation grainière dans le cas du pin pignon représente un volet important dans la perspective d'une mise en valeur de ces peuplements.

2. Mise en place du dispositif expérimental

2.1. Assiette des placettes

Selon Rondeux, (1993), la réalisation d'un inventaire forestier est une question souvent très importante en matière de gestion forestière. Pour des raisons de temps et de budget, il est opportun ou nécessaire de recourir aux méthodes d'inventaire par échantillonnage.

L'implantation des placettes d'échantillonnage est le point le plus essentiel dans tout travail, car il est le point stratégique de la détermination des caractéristiques des peuplements. L'hétérogénéité et la diversité des stations ont imposé une stratification qui tient compte de l'état des peuplements ou îlots envisagé (âge, densité, faciès).

Les critères retenus pour l'installation de nos placettes concernent les caractéristiques topographiques (pentes, expositions et altitudes), la densité du peuplement (nombre d'arbres par unité de surface) et l'état du peuplement (les stations doivent être équilibrées et ne présentent pas des arbres non-conformes trop vieux et malades.).

L'assiette des placettes de forme circulaire est plus intéressante et plus utilisable en raison de son installation facile et rapide sur le terrain (Pardé et Bouchon, 1988). Ainsi, elle permet de réduire considérablement le nombre de cas douteux (arbres litiges) et de déterminer l'appartenance ou non d'arbres à la placette (Rondeux, 1993). En plus, cette forme ne présente pas de directions privilégiées (Pardé et Bouchon, 1988).

La délimitation des placettes est faite par voie optique en utilisant le dendromètre Blume-Leiss et la mire de Pardé. Cette dernière est composée d'une tige métallique graduée comportant deux repères cylindriques dont l'un qui coulisse peut s'écarter de l'autre à une distance telle que l'on veut. La mire est implantée verticalement au futur centre de la placette, la distance entre les deux bandes blanches est fixée selon la surface choisie de la placette, par la suite le rayon de la placette est déterminé par le dendromètre Blume-Leiss. La distance entre les deux voyants dans le cas de terrain horizontal est donnée par la formule suivante :

$$d = 3\sqrt{(S/\pi)}$$

d : distance entre les deux voyants de la mire en terrain horizontal ;

S : surface du cercle a installé en terrain (m²).

Le rayon du cercle dont la surface est 4 ares est égal à 11.28 m. Un calcul simple par la formule précédente prouve que les deux voyants sont distants de 33.85 cm. De même, pour la surface de 6 ares (rayon du cercle égal à 13.81 m) ; un calcul analogue prouve que les deux voyants doivent être écartés à 41.45 cm l'un de l'autre.

Dans le cas où la placette doit être installée sur un terrain incliné, et pour garder la surface désirée en projection sur un plan horizontal, il faut apporter une correction telle que la distance entre les deux bandes sera :

$$d' = d / \cos i$$

d' : distance entre les deux voyants de la mire en terrain incliné ;

d : distance entre les deux voyants de la mire en terrain horizontal ;

i : pente

Tous les arbres qui se trouvent à l'intérieur de la placette, ont été recensés. Néanmoins, pour les arbres limites, on précise l'intersection du diamètre à 1.30 m et les limites du cercle. Si plus de la moitié du tronc est situé à l'intérieur du cercle l'arbre est compté (Pardé, 1967). Au total, 72 placettes temporaires (04 à 06 ares) réparties sur l'ensemble des reboisements de pin pignon étudié ont été échantillonnées.

Tableau 16. Placettes d'échantillonnage.

localisation	Nombre de placettes	surface
Ain Brahim	20	4 ares
Belhacel	30	6 ares
Stidia	10	4 ares
Bouachria	12	6 ares

Toutes les placettes ont fait l'objet d'une description stationnelle détaillée et d'un inventaire dendrométrique complet (hauteur totale, hauteur de houppier, circonférence à 1.30 m, etc.).

2.2. Caractéristiques stationnelles

Afin d'atteindre notre objectif de recherche les caractéristiques stationnelles, ont été déterminées pour chaque placette de façon à pouvoir analyser les facteurs du milieu susceptibles d'agir sur la productivité du pin pignon. Les principales caractéristiques permettant de définir les stations d'étude se résument comme suite :

- Pente : déterminée par un clisimètre
- Altitude : mesurée à l'aide d'un altimètre
- Exposition : orientée au moyen d'une boussole
- Profondeur du sol : déterminée par une tarière pédologique

2.3. Caractéristiques dendrométriques

2.3.1. Mesure de la circonférence à 1.30 m

La circonférence à 1.30 m du sol a été mesurée à l'aide d'un mètre à ruban pour tous les arbres, pré-comptables de la placette dont la circonférence est supérieure à 22 cm. La circonférence minimale à laquelle la production est estimée est de 22 cm, quelle que soit l'utilisation du bois. Les arbres plus petits que cette taille ne seront tout simplement pas inclus dans l'estimation des résineux. Cette circonférence est appelée circonférence du petit-bois correspondant au bois fort. Dans les cas particuliers nous avons procédé à la mesure de la manière suivante :

- Arbre fourchu : si la fourche est située au-dessous de 1.30 m on considère deux tiges distinctes et on mesure deux circonférences. Si la fourche est située au-dessus de 1.30m on mesure une seule circonférence.
- Arbre au tronc sinueux : ont 1.30 m le long du tronc puis on effectue la mesure à ce niveau.
- Arbre présentant une boursouffure au niveau de 1.30m du sol, les mesures sont prises de part et d'autre et on fait la moyenne des deux mesures.

2.3.2. Mesure de la hauteur totale

La hauteur totale de l'arbre est définie comme étant la distance comprise entre le pied de l'arbre et son bourgeon terminal. Néanmoins, dans le cas des arbres présentant une forme tabulaire ou arrondie, la hauteur est prise à la limite de la dernière ramille de la cime. Cette mesure a été réalisée à l'aide du Blum-Leiss, pour tous les arbres de chaque placette. La manipulation de ce dernier nécessite les opérations successives suivantes :

- placer la mire contre l'arbre et choisir une distance de 15, 20, 30, 40 m en fonction de la grandeur de l'arbre et l'importance de la pente ; cette mesure est obtenue à l'aide du viseur dioptrique du Blum-Leiss ;
- viser successivement le pied et le sommet de l'arbre ;
- bloquer chaque fois le pendule et lire respectivement les deux valeurs sur l'échelle correspondante à la distance choisie ;
- Ajouter les 2 valeurs si elles se situent de part et d'autre du zéro des échelles (situation normale en terrain horizontal) ;

- Soustraire la plus petite valeur de la plus grande si elles se trouvent toutes les deux du même côté du zéro des échelles (situation en terrain incliné) ;
- Corriger le résultat obtenu en fonction de la pente pour avoir la hauteur vraie calculée ainsi : (hauteur vraie = hauteur lue x $\sin^2 i$) avec i est la pente de terrain en degré. Le $\sin^2 i$ est donné directement par le tableau de correction qui figure sur une des faces du Blume-Leiss. Si la pente est forte, il est conseillé de se placer sur la même courbe de niveau que celle de l'arbre.

2.3.3. Mesure du diamètre et de la hauteur du houppier

La mesure du diamètre se fait à l'aide d'un ruban mètre « un décamètre a tété utilisé » et tient compte de la projection horizontale du houppier. Rondeux (1993), indique que plus la surface projetée s'éloigne de celle d'un cercle, au plus il convient d'augmenter le nombre de diamètres à mesurer.

Dans le cas de n rayons r , la surface de la projection horizontale S_p résulte de la moyenne quadratique suivante :

$$S_p = \pi \sum_{i=1}^n r_i^2 / n$$

De laquelle on déduit le diamètre moyen du houppier, soit :

$$D_{ho} = \frac{\sqrt{4 S_p}}{\pi} = 2 \sqrt{\sum_{i=1}^n r_i^2 / n}$$

En ce qui concerne la hauteur du houppier, la première grosse branche vivante est considérée comme étant la base de houppier.

2.3.4. Mesure de l'âge des arbres

Pour la plupart des parcelles des reboisements de pin pignon de la région de Mostaganem, l'âge est pratiquement connu et correspond aux années depuis la création du peuplement. Les dates de plantations ont été communiquées par les services de la conservation des forêts. Pour plus des précisions, il est procédé à des sondages des arbres à la tarière de Pressler enfoncée jusqu'au cœur des arbres à 1.30 m du sol et a compter les cernes annuels (Pardé, 1964). Le nombre de cernes donne l'âge de l'arbre, pour une meilleure estimation de cette variable, il est utile d'ajouter 05 années au nombre obtenu pour compenser les 30 cm de souche (Thavaud, 1979). Les arbres dominants doivent être sains, ne présentant pas de signes pathologiques externes. Pour notre cas, les peuplements sont d'âges connus généralement et ce par rapport à la connaissance des dates de plantations (des informations quant à l'année de reboisement

fournies par les services de forêts). L'opération de carottage a été réalisée pour préciser certains cas douteux.

2.3.5. Mesure des variables transformées

Après la récolte des données d'inventaire sur le terrain, sur un total de 72 placettes réparties dans des peuplements aussi réguliers que possible, il a été procédé au calcul des variables dendrométriques relatives à la productivité pour chaque placette (Alder, 1980). Ces variables sont :

- Nombre de tige par hectare (N/ha),
- Circonférence moyenne du peuplement (Cm),
- Circonférence dominante du peuplement (Cdom),
- Hauteur totale moyenne du peuplement (Hm),
- Hauteur totale dominante du peuplement (Hdom),
- Surface terrière du peuplement (G),
- Surface terrière moyenne (\bar{g}),
- Diamètre de l'arbre de surface terrière moyenne ($d\bar{g}$).

2.3.5.1. Nombre de tiges par hectare

Il est obtenu en divisant le nombre total d'arbres vivants sur la placette par la surface totale de la placette.

$$N/H = n/S$$

Avec :

n : nombre des arbres de la placette

S : surface de la placette

2.3.5.2. Hauteur totale moyenne du peuplement (Hm)

Elle représente la moyenne des hauteurs de tous les arbres de la placette.

$$Hm = \sum_{i=1}^n H_i / n$$

Avec :

H_i : hauteurs totales des arbres

n : nombre des arbres de la placette.

3.3.5.3. Hauteur Dominante du peuplement (Hdom)

Dans la littérature, différentes définitions de la hauteur dominante ont été proposées. L'une des définitions les plus courantes (Hummel, 1955 ; Hengst, 1958 ; Hamilton, 1975 ; Rondeux, 1993 ; Wouters, Lorent, 2001 ; Sharma et al., 2002 ; West, 2009 ; Burkhart et Tomé, 2012), la hauteur dominante d'un peuplement est définie comme la hauteur moyenne d'un nombre fixe d'arbres ayant les plus grands diamètres à hauteur de poitrine par unité de surface (peuplement).

Une deuxième définition, la hauteur dominante est la hauteur moyenne d'un nombre fixe des plus hauts arbres par unité de surface (peuplement) (West, 2009). Dans la présente étude, nous utilisons la hauteur dominante, définie par l'IUFRO (union internationale des organismes de recherche forestière) comme la hauteur moyenne des 100 plus gros arbres par hectare (Tomé et al., 2019).

$$H_{dom} = (h_1 + h_2 + \dots + h_{100}) / 100$$

Dans le cas d'une placette d'une superficie de 0.06 ha, la hauteur dominante correspond :

$$H_{dom} = \sum_{i=1}^n H_i / 6$$

2.3.5.4. Surface terrière du peuplement (G)

La surface terrière d'un peuplement est la somme des surfaces terrières de tous les arbres qui le composent. L'unité de la surface terrière s'exprime donc en mètres carrés. De façon à pouvoir comparer les mesures, cette valeur est ramenée à l'hectare. Dans le présent travail la formule appliquée pour le calcul de la surface terrière est la suivante :

$$G = \frac{1}{4\pi} \sum_{i=1}^n C^2 / S$$

Avec :

C : circonférence de l'arbre (m)

S : surface de la placette en hectare

2.3.5.5. Surface terrière moyenne (\bar{g})

Elle est obtenue en divisant la surface terrière du peuplement (G) par le nombre de tige par hectare (N) :

$$\bar{g} = G/N$$

2.3.5.6. Diamètre de l'arbre de surface terrière moyenne ($d\bar{g}$)

C'est la moyenne quadratique des diamètres, obtenue en divisant la somme des carrés des diamètres par le nombre d'arbres de la placette et en prenant la racine carrée du résultat.

$$d\bar{g} = \sqrt{\sum_{i=1}^n di^2 / n} \quad \text{ou} \quad d\bar{g} = \sqrt{4\bar{g}/\pi}$$

3. Étude de la croissance en hauteur dominante des peuplements de pin pignon

L'approche du présent travail s'est basée sur une estimation indirecte, en s'intéressant aux méthodes d'estimation de la productivité ou du potentiel de production des milieux forestiers. Cette approche a pour référence le potentiel de production des peuplements forestiers et est basée sur la hauteur dominante ou encore sur la croissance périodique en hauteur (Schober et Forstliche, 1960 ; Decourt, 1964 ; Assmann, 1970 ; Alder, 1980 ; Parde et Bouchon, 1988).

Dans ce sens, il est opportun de définir la productivité des peuplements de pin pignon équiens en termes de volume maximum capable d'être produit à un endroit donné et sur une période de temps déterminée ou à un âge fixé (70 ans, dans notre cas). La qualité même d'un milieu occupé par le pin pignon est en relation directe avec la productivité qui exprime, en quelque sorte, les effets conjugués des facteurs prépondérants du milieu (effet isolé ou additif).

3.1. Indices et établissement des courbes de productivité

La productivité du site est un domaine d'information stratégique dans la gestion forestière, qui détermine les effets économiques et environnementaux de cette dernière (Skovsgaard et Vanclay, 2013) et permet de prévoir la croissance des peuplements (Bontemps et Bouriaud, 2013). Cette productivité est généralement évaluée à l'aide d'un indice de site, déterminé à partir de la hauteur dominante à un âge prédéterminé, appelé âge de référence (Weiskittel, 2011). Cette méthode d'évaluation basée sur la hauteur dominante s'intègre parmi les méthodes indirectes.

Pour analyser la productivité du pin pignon dans la région de Mostaganem, nous avons utilisé la méthode dendrométrique indirecte basés sur la hauteur dominante qui est argumentée par Otoul (1978) et pour laquelle :

- la mesure de la hauteur dominante est une réalisation pratique et aisée.
- pour une essence déterminée et dans une région climatiquement homogène, la hauteur dominante est étroitement liée à la production totale en volume (lois d'Eichhorn).
- cette relation est indépendante de l'âge du peuplement et de la nature de la station envisagée (Decourt, 1973).

- enfin, cette méthode a été élargie à l'étude de la liaison entre la production et les facteurs du milieu ou de site.

Le choix de la hauteur dominante et non de la hauteur moyenne du peuplement comme critère futur de détermination de fertilité de la station se justifie par la plus grande indépendance de la première vis-à-vis des conditions ou traitements sylvicoles (Hamilton, 1975). Il est admis donc, que cette hauteur est légèrement affectée par la densité du peuplement. La hauteur dominante est aussi en relation directe avec la production totale en volume.

La détermination des âges de toutes nos placettes en nombre de 72, nous a conduits à choisir la valeur de 70 ans comme âge de référence, ce choix se justifie pour les raisons suivantes :

- cette valeur est très proche de la moyenne générale des âges de toutes les placettes (67.5 ans), et l'âge médian (71 ans).
- le nombre de placettes qui possèdent un âge inférieur à cette valeur est égal au nombre de placettes qui ont un âge supérieur.

3.2. Anamorphisme et polymorphisme

D'une manière générale, il existe deux approches pour l'élaboration des modèles de croissance en hauteur dominante, l'une est polymorphique et l'autre est anamorphique (Belghazi et al., 2000).

Dans l'approche polymorphique, chaque courbe de croissance représente une classe de fertilité donnée définie par la hauteur dominante à un âge de référence donné. Ces courbes reflètent des milieux de croissance différents et sont construites à partir des données résultant de plusieurs mesurages des placettes permanentes ou d'analyses de tiges (Duplat, 1986). C'est une approche objective et précise, mais elle nécessite des mesures diachroniques (ou inventaires périodiques) dans des placettes permanentes ou des analyses de tiges.

La deuxième approche anamorphique considère que, quel que soit le milieu de croissance, l'accroissement en hauteur est constant. Elle consiste à ajuster une courbe moyenne (ou courbe guide) au nuage de points à partir de laquelle seront matérialisés les différents niveaux de productivité représentant les différentes classes de fertilité. Elle suppose que la croissance suit une évolution parallèle dans toutes les stations. Les courbes de productivité permettent de retracer l'évolution de la hauteur dominante en fonction de l'âge du peuplement ; à partir de cette définition, il est possible de dire que la croissance en hauteur

dominante pour une espèce donnée dans une région donnée se décrit par un faisceau de courbes étagées qui ne se recoupent pas, chaque peuplement suit au cours du temps une courbe du faisceau quelle que soit la sylviculture qu'il subit ; le niveau de cette courbe dans le faisceau est l'indice de fertilité du peuplement ; il est déterminé par la station (Abbas, 1986).

L'indice de productivité peut être défini en utilisant les courbes qui décrivent l'évolution de la hauteur dominante en fonction de l'âge. Connaissant l'âge et la hauteur dominante du peuplement, il est, en effet, possible d'estimer la hauteur dominante du peuplement atteinte à un âge de référence. Celle-ci caractérise l'indice de productivité de la station vis-à-vis de l'essence considérée (Pauwels et Rondeux, 2002).

3.3. Approche de modélisation de site index

Les méthodes employées dans la construction des modèles de site index ont été extrêmement variées au cours de l'histoire. Elles vont des premières études graphiques anamorphiques basées sur des paires hauteur-âge uniques (Bruce, 1923) à l'analyse des tiges ou aux systèmes basés sur la croissance avec des formes fonctionnelles très empiriques (Alder, 1980) et des modèles basés sur des fonctions de croissance théoriques (Powers et Oliver, 1978 ; Biging et Wensel, 1985). Il existe cependant des thèmes communs à toutes les études, basés sur la manière dont les données sont organisées pour construire les modèles de site index.

3.3.1. Modèles de site index basés sur la méthode ADA

Bien que des formes d'équations invariantes par rapport à l'âge de base soient utilisées depuis les années 1930 (Schumacher, 1939), Bailey et Clutter (1974) ont introduit pour la première fois le concept de dérivation d'une équation de site invariante selon l'âge de référence en utilisant une approche connue sous le nom d'ADA (Algebraic difference approach ou Approche par différence algébrique). Cette méthode est appliquée pour dériver une forme de modèle de site index fonctionnel explicite qui implique :

- a) Identifier une équation ou un modèle de base approprié qui décrit une courbe de hauteur en fonction de l'âge de la forme implicite $H = f(A)$.
- b) Accorder un paramètre dans la courbe de l'équation de base qui est supposée être spécifique au site.
- c) Résoudre l'équation de base pour le paramètre spécifique au site et remplacer tous les termes (H, A) par des variables de condition initiale (H_1, A_1).

d) Substituer le paramètre spécifique au site avec sa solution dans le modèle de base. Ceci produira une équation de base invariante en fonction de l'âge.

Par rapport aux équations traditionnelles spécifiques de l'âge de référence de la forme $H = f(H_s, A)$ ou $H_s = f(H, A)$, un modèle invariant de l'âge de référence devient $H_2 = f(H_1, A_1, A)$. Ainsi, un système à trois variables a été étendu à quatre variables. Conceptuellement, plutôt que d'indexer une courbe spécifique dans une famille de courbes de site par le site index (H_s), la courbe est référencée par n'importe quel point sur celle-ci (H_1, A_1). La propriété invariante ou immuable de ce modèle se réfère aux hauteurs prédites : n'importe quel nombre de points (H_1, A_1) sur une courbe de site spécifique peut être utilisé pour faire des prédictions pour un âge spécifique A et la hauteur prédite sera toujours la même.

3.3.1.1. Exemple de base d'un modèle formulé par ADA

En supposant que A_1 et A_2 ($A_1 < A_2$) sont deux âges successifs des peuplements de la $n^{ième}$ observation, respectivement, les hauteurs dominantes correspondantes sont H_{dom1} et H_{dom2} ($H_{dom1} < H_{dom2}$), sur la courbe du modèle de base telle que définie par :

$$H_{dom1} = b_0 * \exp\left[\frac{-b_1}{(A_1 - b_2)}\right]$$

$$H_{dom2} = b_0 * \exp\left[\frac{-b_1}{(A_2 - b_2)}\right]$$

Trois équations de différence algébriques différentes ont été obtenues en isolant chacun des trois paramètres différents dans les modèles précédents.

1^{er} cas, en isolant paramètre b_0 , l'expression de H_{dom2} était donnée par :

$$H_{dom2} = H_{dom1} * \exp\left[\frac{b_1(A_2 - A_1)}{(A_2 - b_2)(A_1 - b_2)}\right]$$

2^{ème} cas, en isolant paramètre b_1 , l'expression de H_{dom2} était donnée par :

$$H_{dom2} = b_0 (H_{dom1}/b_0)^{(A_1 - b_2) / (A_2 - b_2)}$$

3^{ème} cas, en isolant paramètre b_2 , l'expression de H_{dom2} était donnée par :

$$H_{dom2} = b_0 * \exp\left[\frac{-b_1 \ln(H_{dom1}/b_0)}{\ln\left(\frac{H_{dom1}}{b_0}\right)(A_2 - A_1) - b_1}\right]$$

3.3.2. Modèles de site index basés sur la méthode GADA

Cieszewski et Bailey (2000), notent que les modèles de site index peuvent être considérés comme faisant partie d'une classe plus générale de modèles appelés équations de site index dynamiques qui, en plus de l'ADA, peuvent être dérivés par plusieurs autres méthodes. Ils ont

proposé une extension de la méthode ADA appelée l'approche de la différence algébrique généralisée (GADA). La principale addition de cette approche à la méthode ADA est de permettre à plus d'un paramètre dans un modèle de base d'être spécifique au site.

L'élément central de la méthode GADA est l'introduction d'une variable inobservable de productivité de croissance du site qui est nommée X . Cette variable sera appelée par la suite la variable de site inobservée. X peut être considérée comme une fonction de tous les facteurs qui contrôlent le développement du site et de la hauteur dominante, mise à l'échelle et paramétrée de manière appropriée pour la situation de modélisation en question. La forme explicite de X n'a pas besoin d'être connue, car elle n'est utilisée que dans les étapes intermédiaires et sera finalement remplacée par une fonction des conditions initiales et d'autres paramètres globaux du modèle.

La méthode peut être résumée par les cinq étapes suivantes :

a) Choisissez une équation de base appropriée qui décrit une courbe de hauteur en fonction de l'âge. Les paramètres du modèle de base étant désignés par a , b , c ,..., la forme implicite d'une équation de base est la suivante :

$$H = f(A, a, b, c \dots)$$

b) Identifier dans l'équation de base tous les paramètres qui changent potentiellement pour différents niveaux de productivité du site. Reformuler l'équation de base en remplaçant ces paramètres par des fonctions de X et de nouveaux paramètres globaux. Dans les modèles formulés par GADA, tous les paramètres sont globaux et seront systématiquement désignés par $b_0, b_1, b_2, \dots, b_n$. Cela produira un modèle de la forme :

$$H = f_1(X, A, b_0, b_1, \dots, b_n)$$

c) Résoudre le modèle GADA résultant formulé en deuxième étape pour X . Cela donne la solution générale suivante générale :

$$X = f_2(H, A, b_0, b_1, \dots, b_n)$$

d) Former une solution spécifique pour X en termes de conditions initiales (X_0), ce qui est fait par un remplacement biunivoque de H et A en troisième étape par H_1 et A_1 . On obtient ainsi :

$$X_0 = f_3(H_1, A_1, b_0, b_1, \dots, b_n)$$

e) Remplacer X_0 par X , rassembler les termes, simplifier autant que possible et produire le modèle final de site index basé sur GADA avec la forme implicite suivante :

$$H_2 = f_4(H_1, A_1, A_2, b_0, b_1, \dots, b_n)$$

3.3.2.1. Exemple de base d'un modèle formulé par GADA

a) Choisir un modèle de base : une forme de base de la fonction de croissance de Schumacher (1939) est jugée adaptée :

$$H = a \exp (b/A)$$

b) Pour créer la solution GADA du modèle de Schumacher, il faut d'abord faire en sorte que (a) et (b) soient tous deux des paramètres locaux en remplaçant (a) par une variable de qualité du site inobservée X, et (b) par une fonction linéaire de la qualité du site X, $b_1 + b_0 * X$:

$$H = X \exp ((b_0 + b_1 * X)/A)$$

c) En prenant le logarithme naturel et en résoudre pour X : les opérations algébriques de base donnent :

$$X = (\ln (H) - b_0 * A^{-1}) / (1 + b_1 * A^{-1})$$

d) En remplaçant les conditions initiales H_1 et A_1 dans l'équation pour X, on obtient :

$$X_0 = (\ln (H_1) - b_0 * A_1^{-1}) / (1 + b_1 * A_1^{-1})$$

e) Remplacer X dans la solution GADA par X_0 pour dériver la forme explicite du modèle, simplifiez autant que possible et obtenez :

$$H_2 = H_1 \exp (A_1 (A_2 + b_0) / A_2 (A_1 + b_0))$$

Le tableau suivant (tableau 17) représente les modèles de base testés.

Tableau 17. Modèles de base testés.

N°	Equation	Référence
1	$H = a * (1 - \exp(-bA))^{-c}$	Richards (1959)
2	$H = a \exp(-bA^{-c})$	Lundqvist (1957)
3	$H = \frac{a}{1 + \frac{b}{A^c}}$	McDill-Amateis (1992)
4	$H = a \exp(-b \exp(\frac{c}{(d-1)A^{d-1}}))$	Sloboda (1971)
5	$H = \frac{A^2}{a + bA + cA^2}$	Hosfeld (1822)
6	$H = \frac{a}{a + bA^c}$	Cieszewski-Bella (1989)
7	$H = a * \exp[\frac{-b}{(A - c)}]$	Johnson-Schumacher (1939)
8	$H = a * \exp[a + b * (\frac{1}{A})^c]$	Bailey-Clutter (1974)
9	$H = a \exp(-b \exp(cA)) + d$	Gompertz modifié Jarosz-Klapéc (2002)
10	$H = a * \exp[\frac{b}{A}]$	Schumacher (1939)

3.3.3. Modèle avec variables de site

Le potentiel de production d'une station ou d'un site est lié aux valeurs des paramètres a estimé qu'une équation peut obtenir et est représentée par les coefficients a , b , c , b_0 , b_1 et b_2 . Afin de modéliser les effets des variables de site sur la croissance en hauteur dominante, nous ajoutant ces variables aux paramètres de l'équation choisie. Les paramètres b_0 , b_1 et b_2 sont alors devenus :

$$\text{Modif} = a_1 * X + a_2 + a_3 * X + a_4$$

Où X peut être une variable de profondeur du sol, d'altitude, de pente ou d'exposition.

3.3.3.1. Sélection des variables de site

Lorsqu'un ensemble de données est composé de nombreuses variables, l'identification de celles qui réussissent le mieux à identifier la variabilité du système dans son ensemble est un problème typique traité par les statistiques multi-variées.

L'ensemble des données des variables de site ont été analysées en utilisant l'analyse en composantes principales (ACP) pour détecter laquelle de ces variables représente une corrélation avec le site index, afin de trouver les variables qui expliquent le mieux la variation de la hauteur dominante.

3.4. Paramètres d'ajustement des modèles

La littérature forestière propose de nombreuses fonctions mathématiques pour construire des modèles d'indice de site. Pour la sélection du meilleur modèle, nous avons vérifié tous les modèles possibles en regard des valeurs des paramètres d'ajustement (Coefficient de détermination R^2 , Carré moyen résiduel (CMR), Erreur Absolue Moyenne EAM, Critère d'information d'Akaike AIC et Tests de normalité et homogénéité des résidus.). Les modèles les mieux adaptés sont ceux qui présentent les valeurs de R^2 les plus élevées et les valeurs de CMR, de EAM et celles de AIC les plus faibles.

- Coefficient de détermination (R^2)

Le coefficient de détermination (R^2), soit le carré du coefficient de corrélation linéaire r) est un indicateur qui permet de juger la qualité d'ajustement d'une régression linéaire simple ou multiple. Il mesure l'adéquation entre le modèle et les données observées ou encore à quel point l'équation de régression est adaptée pour décrire la distribution du nuage des points. Ce coefficient varie entre 0 et 100%, soit entre un pouvoir de prédiction faible et un pouvoir de prédiction fort (Sammut et Webb, 2011).

$$R^2 = 1 - (SCR / SCT)$$

SCR : la somme des carrés des résidus,

SCT : la somme des carrés totaux.

- Erreur absolue moyenne (EAM)

C'est est une mesure d'évaluation de modèle utilisée avec les modèles de régression. L'erreur absolue moyenne d'un modèle par rapport à un ensemble de tests est la moyenne des valeurs absolues des erreurs de prédiction individuelles sur le nombre total d'observations. Chaque erreur de prédiction est la différence entre la valeur réelle et la valeur prédite pour l'instance (Sammut et Webb, 2011).

$$\mathbf{EAM} = \sum_{i=1}^n |X_i - X| / n$$

X_i : les valeurs moyennes des hauteurs mesurées,

X : les valeurs prédites des hauteurs,

n : le nombre total d'observations.

- Carré moyen résiduel (CMR)

MSE pour Mean Square Error ou MCE pour moyenne des carrés des erreurs. L'erreur quadratique moyenne d'un modèle par rapport à un ensemble de tests est la moyenne des erreurs quadratiques de prédiction sur les observations (Sammut et Webb, 2011). La formule de calcul change selon le contexte puisque la somme des carrés est divisée par un nombre de degrés de liberté. Dans notre cas (régression non-linéaire) l'équation est la suivante :

$$\mathbf{CMR} = \sum_{i=1}^n \frac{(X_i - X)^2}{n - P - 1}$$

P : le nombre de paramètres dans le modèle.

- Critère d'information d'Akaike (AIC)

Le critère d'information d'Akaike a été développé par le statisticien japonais Hirotugu Akaike. Il s'agit d'une mesure statistique pour l'évaluation comparative entre les modèles. L'AIC indique le modèle qui s'adapte un peu mieux aux données ou observations disponibles que les autres. Il est calculé par l'équation suivante (Beal, 2005) :

$$\mathbf{AIC} = n \text{ Log } (\text{SCR}/n) + 2 P$$

- Tests de normalité et homogénéité des résidus

Pour valider l'adaptation d'un modèle, il est essentiel de vérifier le comportement qualitatif des résidus (Fonweban et Houllier, 1995). Dans ce contexte, il est important de vérifier l'hypothèse que les résidus sont identiquement distribués, cela revient encore à vérifier que ces dernières sont homogènes (test d'homogénéité) et qu'elles suivent une loi normale ou non (test de normalité).

5. Production de cônes et de graines

La maturation des cônes chez le pin pignon s'étale sur deux ans, de la pollinisation à la libération des graines. Les fleurs femelles sont pollonisées à l'automne de la 1^{re} année et la fécondation à lieu au printemps de la 2^e année. La croissance des cônes fertiles se produit principalement après la pollinisation jusqu'à l'automne de la même année (stade 1), mais la

maturation des graines mûres ne se produit qu'en automne et en hiver de 3^e année (stade 2). En automne, les cônes des deux stades 1 et 2 se distinguent facilement par leur couleur et leur taille. Dans le but de déterminer le nombre de cônes/arbre, nous avons quantifié tous les cônes âgés de 2 et 3 ans. L'avantage de considérer ces cônes non-mûrs (2 ans) réside dans le fait qu'ils ne soient pas encore récoltés et qu'ils permettent de refléter la production de cônes de manière plus fiable.

Pour les mesures de taille (longueur, largeur et diamètre), poids des cônes, le nombre de graines par cône ainsi le poids des graines et des pignons notre choix a été orienté vers la collecte des cônes de 3 ans au niveau des arbres dominants de chaque placette de manière à avoir une moyenne de 25 à 30 cônes par placette. L'ouverture des cônes a été adoptée par la méthode de Franclet (1970), cette méthode consiste à tremper les cônes pendant 15 secondes dans l'eau chaude pour provoquer des ruptures dans les joints de résine scellant les écailles. Une fois sortis de l'eau, les cônes sont placés dans une étuve pendant 16 heures à une température de 60 °C. Le tableau suivant indique le protocole des mesures et les expressions de détermination du rendement en graines et en pignons.



Figure 17. Séchage des cônes et extraction des graines.

Le tableau ci-après présente les Caractéristiques, procédure et mesure des fruits du pin pignon.

Tableau 18. Caractéristiques des fruits du pin pignon.

Caractéristique	Abréviation	Unité	Procédure et mesure
Poids du cône	PC	g	Cônes de 3ans ont été pesés dans une balance analytique électronique
Longueur du cône	LC	cm	Mesuré avec un pied à coulisse
Diamètre du cône	DC	cm	Mesuré avec un pied à coulisse dans la grande section
Nombre de graines/cône	NG	N°	Toutes les graines ont été extraites de chaque cône et comptées.
Poids de la graine	PG	g	Chaque graine a été pesée dans une balance analytique électronique
Rendement en graines	RG	%	$RG = ((NG * PG) / PC) * 100$
Nombre de pignons/cône	NP	N°	Tous les pignons de chaque cône ont été comptés
Poids de pignon	PP	g	Chaque pignon a été pesé dans une balance analytique électronique
Rendement en pignons	RP	%	$RP = ((NP * PP) / PC) * 100$

6. Analyses des données et traitements statistiques

L'analyse en composantes principales, les tests non-linéaires des données, l'ajustement des modèles et les différents tests sont réalisés par le logiciel Statistical Package for the Social Sciences (SPSS).

Chapitre V

Resultats et Discussions

1. Caractéristiques dendrométriques et écologiques des placettes d'étude

Les caractéristiques dendrométriques et écologiques des différentes placettes étudiées sont résumées dans le tableau suivant (tableau 19).

Tableau 19. Caractéristiques dendrométriques et écologiques des placettes étudiées.

Caractéristiques	Minimum	Maximum	Moyenne	Coefficient de variation (%)
Caractéristiques dendrométriques				
Circonférence moyenne à 1.30m Cm (cm)	43.17	60	86.19	34.58
Circonférence dominante à 1.30m Cdom (cm)	61.5	195.66	111.65	29.87
Hauteur totale moyenne Hm (m)	5.32	12.72	8.79	24.7
Hauteur dominante Hdom (m)	6.25	14.5	11.05	21.17
Diamètre moyen d'houpier CDA (m)	2.82	16.42	6.88	42.44
Âge (année)	42	100	67.5	24.9
Nombres de tiges par hectare (N/ha)	183.33	900	375.88	51.7
Surface terrière G (m ² /ha)	9.22	42.43	19.98	33.66
Surface terrière moyenne \bar{g} (m ²)	0.51	3.63	1.33	51.21
Diamètre de l'arbre de surface terrière moyenne $d\bar{g}$ (cm)	80.58	214.98	126.84	23.7
Caractéristiques écologiques				
Altitude (m)	32	372	170.66	75.97
Pente (%)	03	27	8.51	61.71
Profondeur du sol (m)	0.1	0.85	0.33	58.98
Exposition	Sud-est 2.77 %	Nord 31.94 %		

Les valeurs du coefficient de variation (CV ; rapport entre l'écart-type et la moyenne) ont montré une certaine homogénéité entre les différentes mesures dendrométriques.

Pour les valeurs de CV des caractéristiques dendrométriques, la valeur la plus élevée est celle du nombre de tiges par hectare (N/ha) avec 51.7 %. D'autre part, la valeur CV de la hauteur dominante était la plus faible avec 21.7 %.

Des différences significatives ont été constatées entre les conditions écologiques des placettes d'échantillonnage. Cette hétérogénéité est confirmée par le CV, qui est plus ou moins important pour les différentes mesures écologiques (valeurs de CV >58 %). Ce dernier donne une bonne idée sur le potentiel d'adaptation de l'espèce étudiée.

2. Structure globale du peuplement

Lorsque, dans un peuplement, on procède au regroupement de toutes les tiges recensables par catégorie de grosseur, on définit une distribution de fréquences. Celle-ci présente un grand intérêt en matière de gestion forestière, car elle est une expression de la structure de peuplement. Elle traduit aussi la réaction de celui-ci aux conditions de croissance et aux opérations sylvicoles pratiquées (Barbeito, 2009). La figure suivante présente la distribution des nombres de tiges par catégories de circonférences à 1.30 m de pin pignon de la zone d'étude.

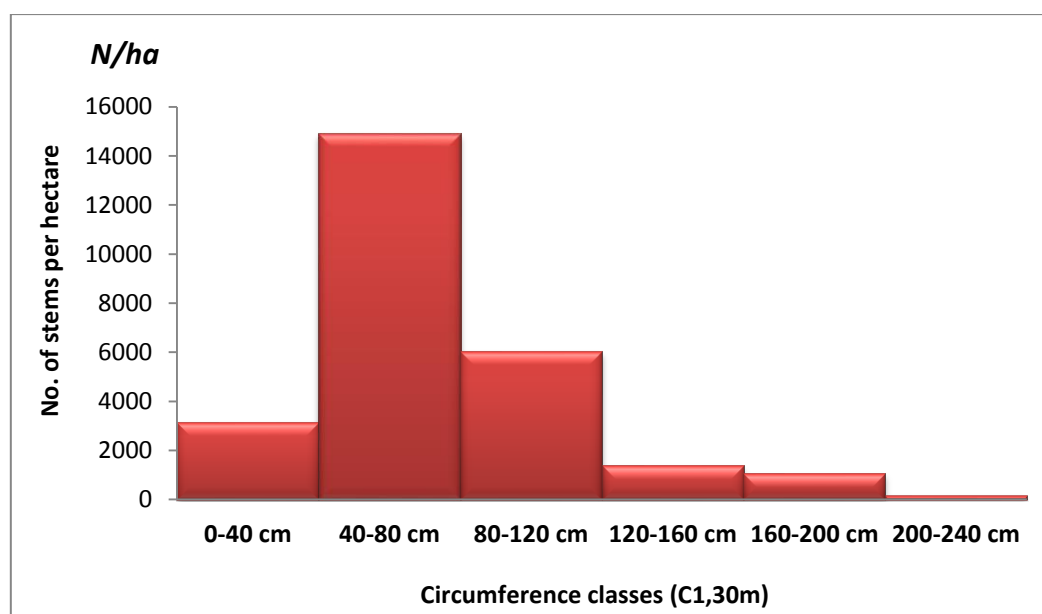


Figure 18. Histogramme de fréquences du Pin pignon en fonction des classes de circonférences ($C_{1,30m}$).

En effet, la structure des peuplements de la zone d'étude est régulière et constituée de plusieurs peuplements équiennes. Les peuplements sont constitués dans leurs majorités par

des arbres appartenant à la deuxième (40-80 cm) et la troisième (80-120 cm) classes de circonférence, formant ainsi des peuplements jeunes. Les autres classes sont faiblement représentées avec un déficit en gros bois (arbres de circonférence entre 200 et 240 cm).

3. Relation entre les paramètres dendrométriques

3.1. Relation entre la hauteur totale et la circonférence

Selon Sabatia et Burkhart (2013), les mesures des hauteurs et des circonférences à hauteur poitrine des peuplements forestiers sont également utiles pour prendre des décisions de gestion et de planification d'activités telles que les éclaircies, la récolte, ou encore les opérations d'amélioration.

Généralement, les relations hauteur-circonférence ou hauteur-diamètre sont appliquées à des peuplements équiennes et peuvent se baser sur des fonctions linéaires (Johnson, 1949; Sanchez et al., 2003), mais également sur des fonctions non-linéaires (Huang et al., 1992).

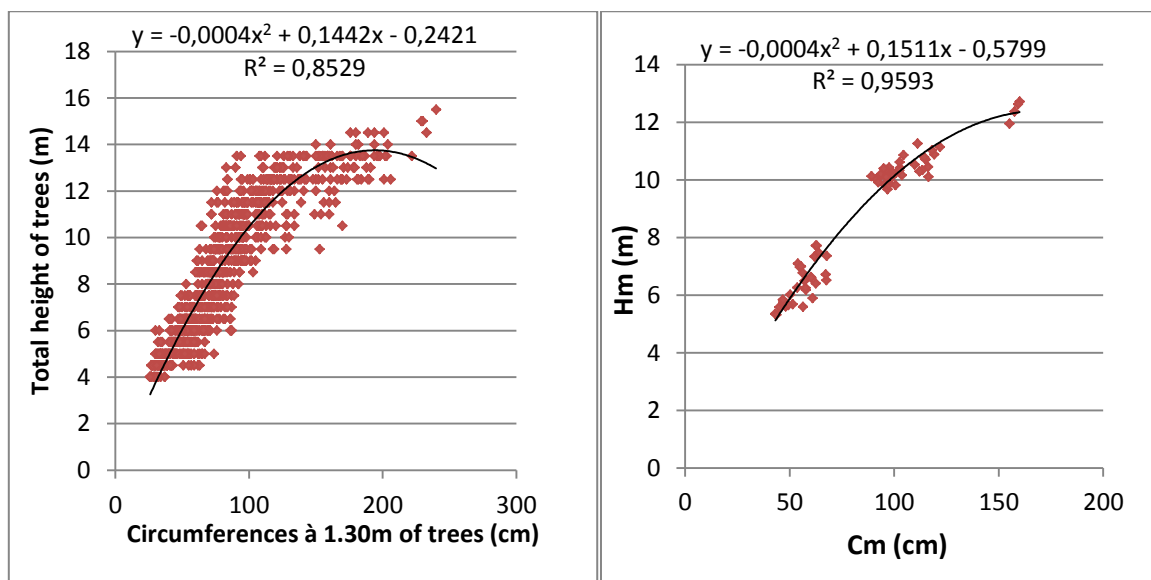


Figure 19. Evolution de hauteur totale en fonction de la circonférence à 1.30 m des placettes étudiées.

La figure 19 illustre parfaitement l'existence d'une relation unique entre la hauteur totale moyenne et la circonférence moyenne des placettes. La hauteur totale des arbres et la hauteur totale moyenne des placettes étudiées sont équitablement réparties de part et d'autre de la courbe de tendance polynomiale.

Ces résultats sont confirmés par la valeur élevée du coefficient de détermination (R^2) qui s'étale de 0.85 à 0.95 respectivement pour la relation (hauteur totale-circonférence) de tous les arbres et la relation (Hauteur totale moyenne- circonférence moyenne) des placettes étudiées.

3.2. Relation entre le diamètre de houppier et le diamètre à hauteur poitrine

Le houppier d'un arbre représente son potentiel de croissance et de développement (Bechtold et al., 2002). Les dimensions d'houppier de l'arbre, en particulier la dimension horizontale, le rayon ou le diamètre, sont bien corrélées au DHP de l'arbre. la relation Diamètre houppier/DHP est particulièrement utile pour déterminer les facteurs de concurrence de la couronne (Krajicek et al., 1961 ; Vezina, 1963 ; Strub et al., 1975), la densité de peuplement (Dawkins, 1963 ; Roberts et Ross, 1965 ; Minckler et Gingrich, 1970 ; Goelz, 1996), la croissance des arbres et pour déterminer le volume des arbres et des peuplements (Minor, 1951 ; Bonnor, 1968 ; Gering et May, 1995).

La figure suivante (figure 20) représente la relation entre diamètre de houppier (mesuré au sol) et le diamètre à hauteur poitrine de tous les arbres étudiés ainsi la relation entre le diamètre de houppier moyen et le diamètre moyen à hauteur poitrine des différentes placettes de la zone d'étude.

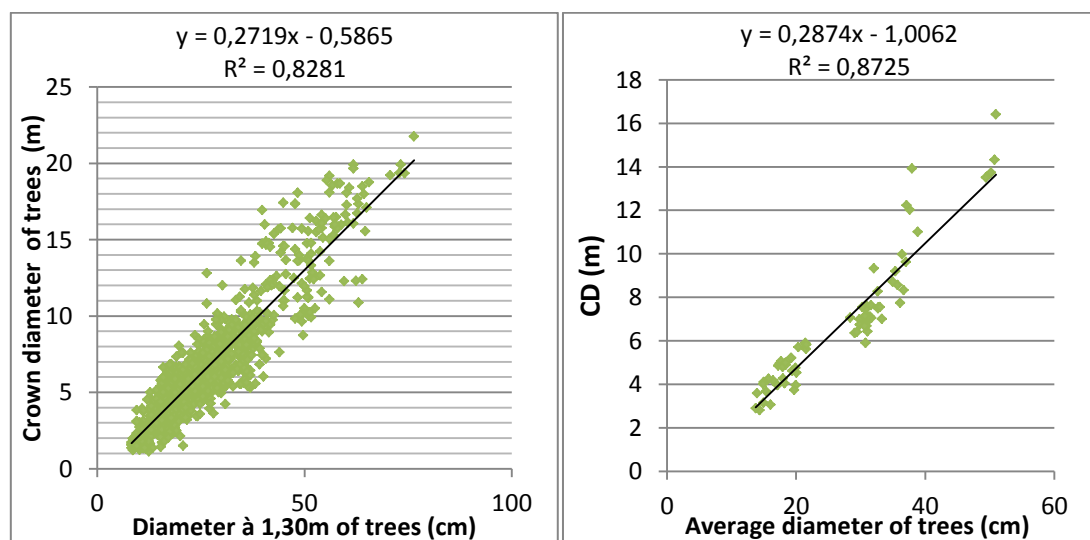


Figure 20. Relations diamètre houppier-diamètre à 1.30 m et diamètre moyen de houppier-diamètre moyen à 1.30 m des placettes étudiées.

L'ajustement linéaire entre le diamètre houppier et le diamètre à hauteur poitrine a permis de représenter des relations (figure 20), avec des coefficients de détermination (R^2) élevés et varient de 0.82 pour la relation diamètre houppier-diamètre à hauteur poitrine à 0.87

pour la relation diamètre moyen d'houpier-diamètre moyen à hauteur poitrine des placettes étudiées.

3.3. Relation entre la surface terrière et les deux paramètres, DHP et Diamètre de houpier

La surface terrière est l'une des caractéristiques les plus importantes en matière d'étude de peuplements forestiers. Le suivi dans le temps de cette grandeur donne en effet un indice précis de la productivité d'une parcelle, via la croissance en diamètre des arbres. Burrows (2002), mentionne que la relation entre ces deux derniers pourrait être utilisée pour faciliter l'estimation de la biomasse puisque la surface terrière peut rapidement être mesurée. Vu sa simplicité et sa commodité d'emploi, la surface terrière est un critère très souvent évoqué et utilisé pour définir la plénitude d'un peuplement forestier (Rondeux, 1993). On peut s'attendre à une corrélation entre la surface terrière et les deux diamètres DHP et diamètre moyen de houpier.

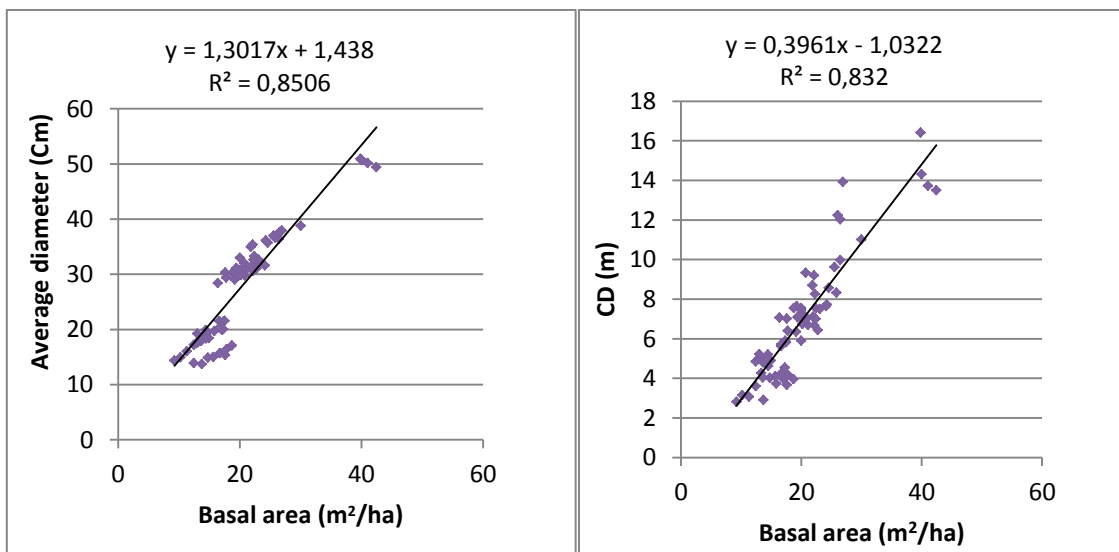


Figure 21. Relation surface terrière-diamètre moyen à 1.30 m et la relation surface terrière-diamètre moyen d'houpier des placettes étudiées.

À travers la présentation graphique (figure 21), il est observé une corrélation positive entre la surface terrière et la croissance en diamètre à 1.30 m du tronc et en diamètre de houpier, qui sont des bons indicateurs de productivité des stations forestières où il est enregistré des coefficients de détermination (R^2) élevés de 0.85 et 0.83 respectivement.

4. Influence des facteurs écologiques sur la croissance et la productivité du pin pignon

La compréhension du fonctionnement des peuplements forestiers est une préoccupation essentielle en sciences forestières. La gestion durable de ces peuplements dépend du niveau de connaissance acquis sur leur fonctionnement.

L'objectif de notre démarche est d'estimer la productivité du pin pignon, représentée par des caractéristiques dendrométriques, et de déterminer les facteurs écologiques qui influencent cette productivité. Dans ce contexte, nous avons essayé de mettre en évidence la relation entre les facteurs écologiques (profondeur du sol, altitude, exposition et pente) et les caractéristiques dendrométriques pour chaque placette. Le tableau 20 présente la matrice de corrélation entre les 11 variables.

Tableau 20. Matrice de corrélation entre les variables dendrométriques et écologiques.

Correlation matrix

Corrélation	Age (years)	Hm (m)	Hdom (m)	Cm (cm)	Cdom (cm)	CDA (m)	G (m ² /ha)	Altitude (m)	Pente (%)	Profon sol (m)	Exposition
Age (années)	1.000	0.943	0.907	0.953	0.942	0.886	0.831	0.592	0.331	0.797	0.126
Hm (m)	0.943	1.000	0.931	0.954	0.931	0.838	0.810	0.748	0.397	0.777	0.110
Hdom (m)	0.907	0.931	1.000	0.860	0.855	0.762	0.698	0.648	0.314	0.764	0.094
Cm (cm)	0.953	0.954	0.860	1.000	0.984	0.934	0.922	0.665	0.398	0.799	0.105
Cdom (cm)	0.942	0.931	0.855	0.984	1.000	0.926	0.927	0.627	0.381	0.776	0.092
CDA (m)	0.886	0.838	0.762	0.934	0.926	1.000	0.912	0.459	0.307	0.795	0.081
G (m ² /ha)	0.831	0.810	0.698	0.922	0.927	0.912	1.000	0.519	0.369	0.724	0.052
Altitude (m)	0.592	0.748	0.648	0.665	0.627	0.459	0.519	1.000	0.579	0.458	0.142
Pente (%)	0.331	0.397	0.314	0.398	0.381	0.307	0.369	0.579	1.000	0.165	-0.071
Profosol (m)	0.797	0.777	0.764	0.799	0.776	0.795	0.724	0.458	0.165	1.000	0.227
Exposition	0.126	0.110	0.094	0.105	0.092	0.081	0.052	0.142	-0.071	0.227	1.000

La composante principale 1 explique à elle seule 99 % de la variance, ce qui indique le degré de redondance entre les variables (figure 22).

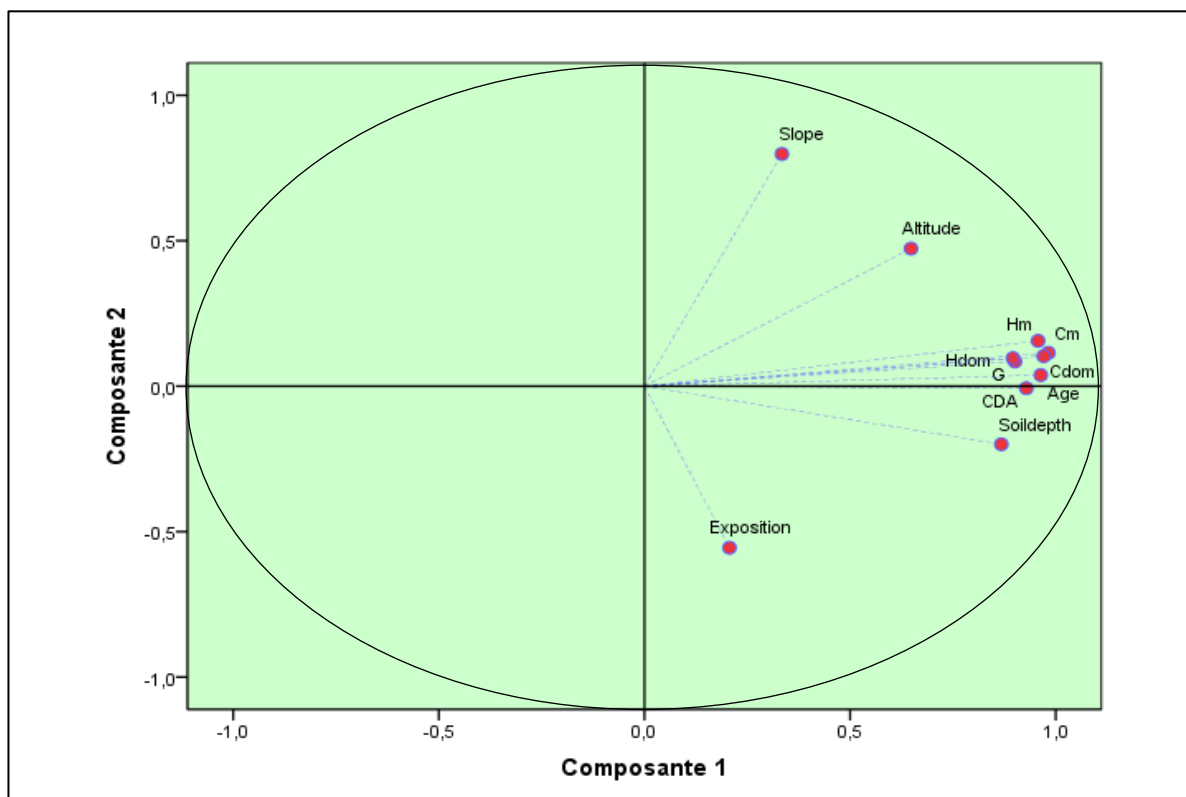


Figure 22. Cercle de corrélation entre les variables dendrométriques et écologiques.

La figure 22 et le tableau 20 montrent une corrélation positive entre toutes les caractéristiques dendrométriques et les facteurs écologiques. La corrélation entre la profondeur du sol et les caractéristiques dendrométriques est très élevée. La corrélation entre ces dernières et l'altitude est également élevée, bien qu'un peu plus faible. Par contre, on note une très faible corrélation entre les variables dendrométriques et les deux variables, exposition et pente.

L'influence de la profondeur du sol sur les paramètres dendrométriques est remarquable. Ceci indique que le pin pignon se développe bien dans les sols profonds. En outre, la corrélation positive entre la profondeur du sol et la circonférence moyenne est la plus élevée par rapport aux autres paramètres dendrométriques.

L'effet de l'altitude sur les caractéristiques dendrométriques est significatif. On peut constater que la corrélation est positive et importante entre l'altitude et la hauteur moyenne. Les peuplements étudiés sont situés entre 31 et 373 m d'altitude, où on a observé que l'espèce étudiée trouve ses conditions préférentielles à des altitudes plus ou moins supérieures à 95 m.

5. Modélisation de la croissance du pin pignon

Les hauteurs dominantes et les âges mesurés au sein de chaque placette ont été mis en relation $H_{dom} = f(\text{âge})$. La figure 23 montre la répartition des valeurs de la hauteur dominante en fonction de l'âge de la zone d'étude.

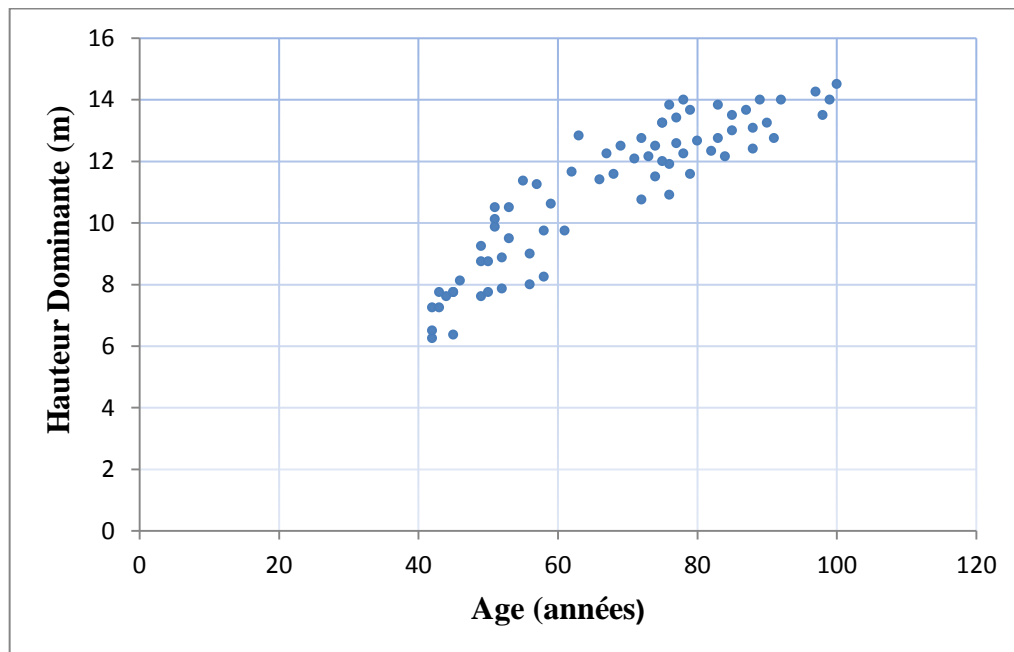


Figure 23. Répartition des valeurs de la hauteur dominante en fonction de l'âge (Région de Mostaganem)

5.1. Modèle de base

5.1.1. Choix d'un modèle de base

Les deux tableaux (21 et 22) traduisent les statistiques de la qualité d'ajustement résultant des trois premiers modèles testés. Alors que la figure 24 présente les histogrammes et les diagrammes de dispersion de leurs résidus.

Par souci de simplification, seuls les résultats des trois premiers modèles qui ont donné les meilleurs ajustements sont présentés.

Tableau 21. Tests arithmétiques des trois premiers modèles de base.

Modèle	Fonctions	Paramètres d'ajustement			
		R ²	CMR	EAM	AIC
Schumacher (1939)	$H = a * \exp\left[\frac{b}{A}\right]$	0.860	0.787	0.695	-4.834
Johnson-Schumacher (1939)	$H = a * \exp\left[\frac{-b}{(A - c)}\right]$	0.870	0.736	0.670	-7.048
Hosfeld (1832)	$H = \frac{A^2}{a + bA + cA^2}$	0.869	0.736	0.676	-6.709

Tableau 22. Tests de normalité des résidus des trois premiers modèles de base.

Tests de normalité

	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Statistique	ddl	Signification	Statistique	ddl	Signification
Schumacher (Résidus)	0.072	72	0.200*	0.986	72	0.615
Johnson-Schumacher (Résidus)	0.050	72	0.200*	0.988	72	0.722
Hosfeld (Résidus)	0.057	72	0.200*	0.990	72	0.818

En général, les différences dans les résultats d'ajustement global n'étaient pas majeures, même la distribution des résidus des trois modèles a suivi la courbe de Gauss, aussi les écarts entre les trois modèles de base et les hauteurs dominantes observées ont été dans la majorité des cas inférieurs à 2 mètres (figure 24). Le modèle Johnson-Schumacher a présenté un coefficient de détermination plus élevé, une valeur du carré moyen résiduel plus proche de zéro (0), qui est similaire à celle du modèle Hosfeld et des valeurs minimales d'EAM et AIC par rapport aux autres modèles. Le modèle Hosfeld a fourni un niveau de signification des résidus le plus haut, bien qu'il n'ait pas fourni le meilleur ajustement. En outre, les résultats classent le modèle Schumacher dans la troisième place.

On peut conclure que le modèle Johnson-Schumacher est le mieux adapté à décrire la croissance du pin pignon dans la région de Mostaganem.

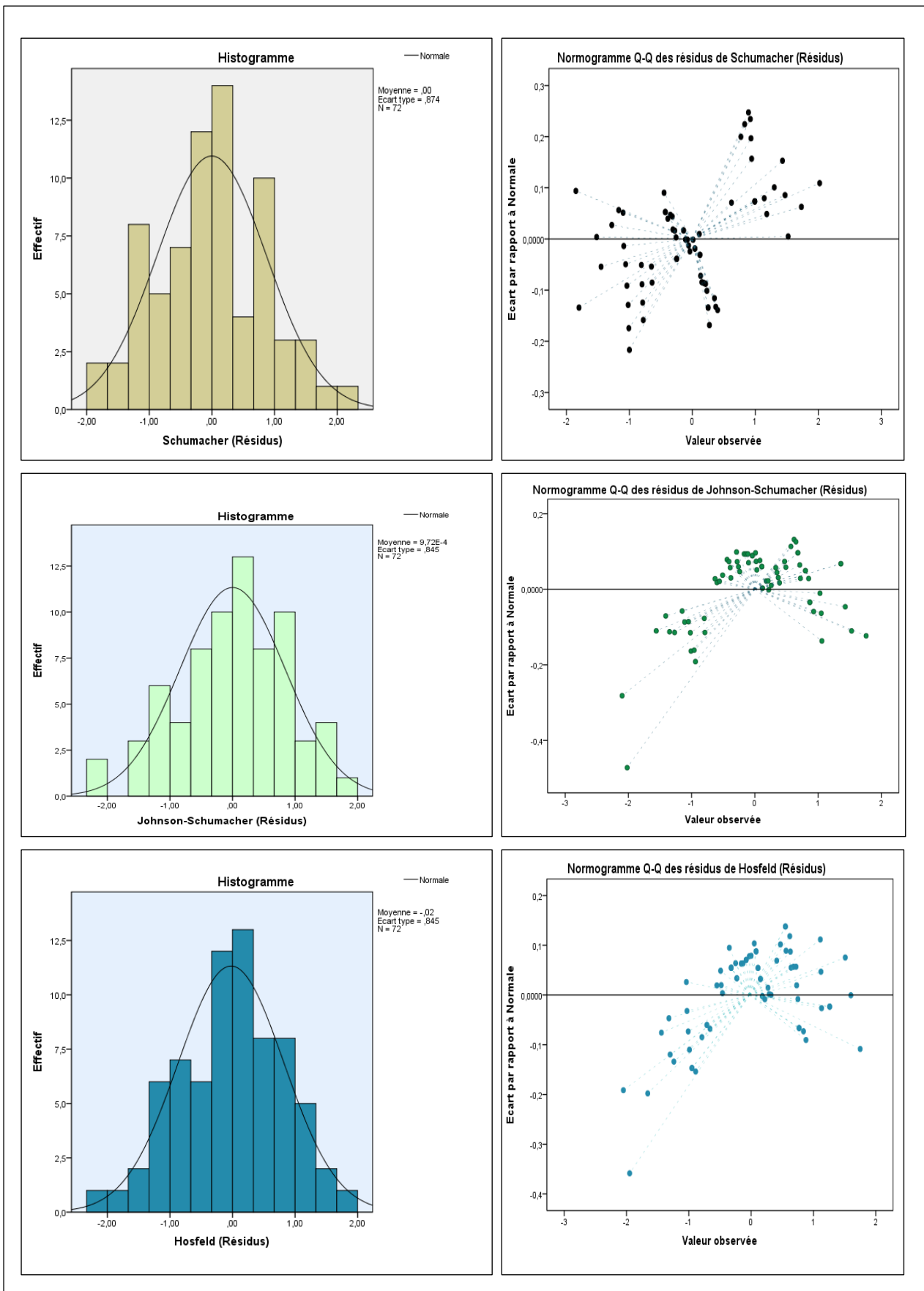


Figure 24. Histogramme (droite) et Diagrammes (gauche) de dispersion des résidus.

5.1.2. Courbes de croissance du pin pignon du modèle de base

Le modèle de Johnson-Schumacher se présente sous la forme générale suivante :

$$H_{dom} = a \exp(-b / (Age - c))$$

Où :

H_{dom} : hauteur dominante (m),

Age : âge absolu,

a, b et c : paramètres d'asymptote, d'inclinaison et d'inflexion.

Le modèle de Johnson-Schumacher a permis d'établir des courbes de productivité à l'âge de référence 70 ans en appliquant l'équation suivante :

$$H_{dom} = \frac{0,2}{\exp\left[\frac{-b}{(1-c)}\right]} * \exp\left[\frac{-b}{(Age - c)}\right]$$

Dans ces conditions, le paramètre b_0 résulte de l'expression :

$$a = \frac{0,2}{\exp\left[\frac{-b}{(1-c)}\right]}$$

Alors la valeur du paramètre b a été obtenue de telle manière que pour l'âge de référence de 70 ans les hauteurs dominantes coïncident exactement avec le site index I_0 . Cette valeur a été exprimée selon l'équation suivante :

$$b = \frac{(70 - c)(1 - c) \left[\ln\left(\frac{I_0}{0,2}\right) \right]}{69}$$

Les trois niveaux retenus s'étendent de la classe I (supérieure) à la classe III (inférieure), correspondant à des hauteurs dominantes à 70 ans variant de 15 à 09 m par pas ou écart de trois mètres.

Les valeurs des paramètres a, b et c estimées pour les différents sites index I_0 sont reportées dans le tableau 23.

Tableau 23. Valeurs des paramètres du modèle de Johnson-Schumacher en fonction des indices de productivité prédéterminés I_0 .

Classe de productivité	Site Index I_0	Paramètres		
		a	b	c
I	15	17.39	10.53	-1.36
II	12	13.79	10.16	-1.40
III	9	10.30	9.61	-1.44

Ces résultats donnent lieu à des hauteurs dominantes atteintes à différents âges (tableau 24) et permettent d'établir les courbes de productivité proprement dites (figure 25).

Tableau 24. Valeurs des hauteurs dominantes (m) en fonction des âges pour les 03 sites index.

Age (années)	Hauteur dominante (m)		
	$I_0 = 15$	$I_0 = 12$	$I_0 = 9$
10	6.88	5.56	4.44
20	10.62	8.57	6.57
30	12.43	9.97	7.58
40	13.48	10.78	8.16
50	14.14	11.31	8.54
60	14.64	11.68	8.80
70	15	12	9
80	15.27	12.17	9.15
90	15.49	12.33	9.27
100	15.67	12.47	9.36

Les 03 classes de croissance sont matérialisées par un faisceau de courbes qui caractérise leurs différents niveaux de productivité.

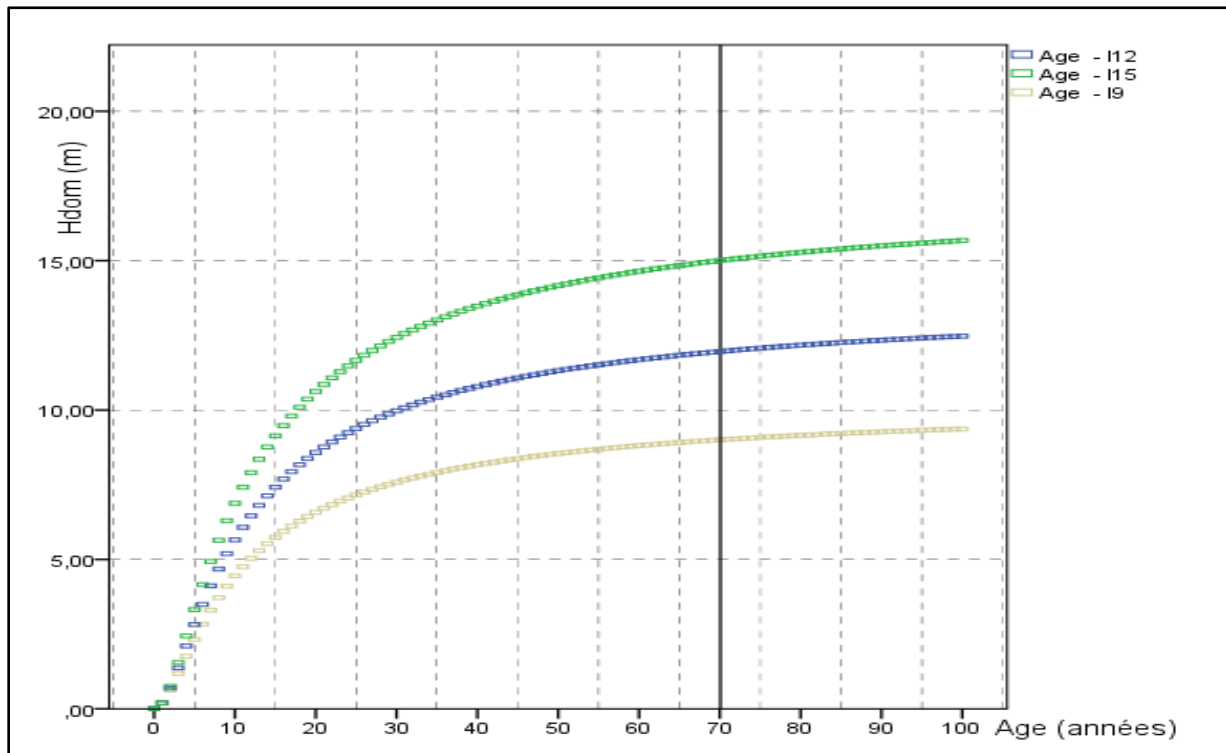


Figure 25. Courbes de croissance en hauteur dominante du pin pignon (Modèle de base)

L'analyse de l'ensemble des résultats révèle que la productivité moyenne (Classe II) des peuplements du pin pignon de la région de Mostaganem se situe entre les classes I (Classe supérieure : $I_0 = 15$ m) et la classe III (Classe inférieure : $I_0 = 09$ m) telles que nous les avons définies, ce qui correspond à 12 m de hauteur dominante à l'âge de référence de 70 ans.

5.2. Modèle dynamique

5.2.1. Choix du modèle dynamique

Les équations dynamiques testées et les résultats des tests d'ajustements sont énumérés dans les tableaux suivants (tableau 25 et tableau 26).

Tableau 25. Modèles de base et équations dynamiques testées.

Modèle de base	Paramètres Relatif au site	Solution pour X	Équation dynamique	Référence	
Hosfeld (1822) $h = \frac{A^2}{a + bA + cA^2}$	a=X	$X_0 = (A_1^2/h_0) - bA_1 - cA_1^2$	$h_2 = h_1 * \frac{A^2}{A_1^2 + h_1(b(A_2 - A_1) + c(A_2^2 - A_1^2))}$	Tomé (1989) Amaro et al. (1998) (G1)	
	b=X	$X_0 = (A_1/h_0) - aA_1^{-1} - cA_1$	$h_2 = h_1 * \frac{A}{A_1 + h_1(a(A_2^{-1} - A_1^{-1}) + c(A_2 - A_1))}$	Tomé (1989) Amaro et al. (1998) (G2)	
	c=X	$X_0 = (1/h_0) - aA_1^{-2} - cA_1^{-1}$	$h_2 = h_1 * \frac{1}{1 + h_1(a(A_2^{-2} - A_1^{-2}) + b(A_2^{-1} - A_1^{-1}))}$	Tomé (1989) Amaro et al. (1998) (G3)	
				$h_2 = \frac{1}{(\frac{1}{h_1}) + b_1(\frac{1}{A_2^{b_2}} - \frac{1}{A_1^{b_2}})}$	Burkhart et Tomé (2012) (A1)
				$h_2 = h_1 * (A_2^{b_2} / A_1^{b_2}) (b_0 + A_1^{b_2}) / (b_0 + A_2^{b_2})$	Peschel (1938) Burkhart et Tomé (2012) (A2)
Schumacher (1939) $h = a * \exp\left[\frac{b}{A}\right]$	a=X b=b ₀ /X	$X_0 = 0.5 * (\ln(h_1) + ((\ln(h_1))^2 - 4b_1A_1^{b_1})^{0.5})$	$h_2 = \exp(X_0 - \left(\frac{b_1}{X_0}\right) * A_2^{b_1})$	Cieszewski (2004) (G4)	
	a=X b=b ₀ +b ₁ X	$X_0 = \frac{\ln(h_1) - b_0A_1^{-1}}{1 + b_1A_1^{-1}}$	$h_2 = \exp(X_0 + (b_0 + b_1X_0) * A_2^{-1})$	Cieszewski (2002) (G5)	
			$h_2 = h_1 \exp(-b_1((1/A_1) - (1/A_2)))$	Burkhart et Tomé (2012) (A3)	

			$h_2 = h_1 \exp(-b_1 ((1/A_2)^{b_2} - (1/A_1)^{b_2}))$	Lundqvist (1957) Burkhardt et Tomé (2012) (A4)
			$h_2 = h_1 \exp(-(b_1 + b_2 A_1)((1/A_1) - (1/A_2)))$	Kimberley et Ledgard (1998) Burkhardt et Tomé (2012) (A5)
Johnson–Schumacher (1939) $h = a * \exp[\frac{-b}{(A - c)}]$	a=X b=b ₀ /X	$X_0 = \frac{0.5 * (\ln(h_1) + ((\ln(h_1))^2 - 4b_1(A_1 + b_2)^{-b_1})^{0.5})}{1 + b_1}$	$h_2 = \exp(X_0 - (\frac{b_1}{X_0}) * (A_2 + b_2)^{-b_1})$	Cieszewski (2004) (G6)
	a=X b=b ₀ +b ₁ X	$X_0 = \frac{\ln(h_1) - \frac{b_0}{A_1 - b_2}}{\frac{1 + b_1}{A_2 - b_2}}$	$h_2 = \exp((X_0 + ((b_0 + b_1 X_0)/(A_2 - b_2)))$	Cieszewski (2002) (G7)
			$h_2 = h_1 * \exp[\frac{b_1(A_2 - A_1)}{(A_2 - b_2)(A_1 - b_2)}]$	Bailey et Clutter (1974) (A6)
			$h_2 = b_0 (h_1/b_0)^{(A_1 - b_2) / (A_2 - b_2)}$	Bailey et Clutter (1974) (A7)
			$h_2 = b_0 * \exp[\frac{-b_1 \ln(h_1/b_0)}{\ln(\frac{h_1}{b_0})(A_2 - A_1) - b_1}]$	Bailey et Clutter (1974) (A8)
				$h_2 = h_1 \exp((-b_0/A_2 + b_1) - (-b_0/A_1 + b_1))$

h: hdom, A : age, (a, b, c, d, b₀, b₁, b₂) : paramètres à estimées.

Tableau 26. Résultats d’ajustement des modèles dynamiques.

Modèle de base	Équation dynamique	Paramètres d’ajustement				
		R ²	CMR	EAM	AIC	Sign
Hosfeld (1822) $H = \frac{A^2}{a + bA + cA^2}$	G1	0.859	0.789	0.690	-4.718	0.759
	G2	0.869	0.735	0.676	-6.918	0.818
	G3	0.864	0.764	0.682	-5.740	0.691
	A1	0.869	0.736	0.675	-6.874	0.816
	A2	0.845	0.873	0.755-	-1.549	0.814
Schumacher (1939) $H = a * \exp\left[\frac{b}{A}\right]$	G4	0.860	0.786	0.695	-4.834	0.615
	G5	0.860	0.789	0.695	-4.723	0.639
	A3	0.856	0.809	0.708	-3.937	0.622
	A4	0.860	0.786	0.695	-4.822	0.638
	A5	0.860	0.789	0.695	-4.723	0.639
Johnson–Schumacher (1939) $H = a * \exp\left[\frac{-b}{(A - c)}\right]$	G6	0.870	0.731	0.667	-7.093	0.732
	G7	0.866	0.750	0.691	-6.293	0.692
	A6	0.865	0.759	0.675	-5.943	0.577
	A7	0.865	0.759	0.675	-5.943	0.577
	A8	0.855	0.812	0.722	-3.838	0.793
	A9	0.869	0.733	0.668	-7.017	0.703

A1, A2.... : ADA modèle, G1, G2... : GADA modèle .

Tous les paramètres étaient significatifs à un niveau de signification supérieur à 5 %. Les valeurs des statistiques comparatives pour les seize (16) modèles dynamiques présentées dans le tableau précédent a montré que le modèle le mieux adapté aux données est le modèle G6, suivi des modèles A9, G2 et A1, qui présentent tous des ajustements très proche. Ces modèles comprennent deux équations de l’approche GADA (G6 et G2) provenant respectivement de Cieszewski (2004) et Burkhart-Tomé (2012) respectivement, et deux équations anamorphiques de l’approche ADA (A9 et A1). Quatre modèles ont fourni des niveaux de signification élevés, bien qu'ils n'aient pas fourni le meilleur ajustement. Plus précisément, ces modèles comprennent une équation de l’approche GADA (G2) de Tomé (1989) et Amaro (1998), et trois équations de l’approche ADA (A1, A2, Burkhart et Tomé, 2012) et (A8, Bailey et Clutter, 1974).

5.2.2. Courbes de croissances du modèle dynamique

Les courbes de croissances du modèle dynamique choisi (G6) sont présentées dans la figure suivante.

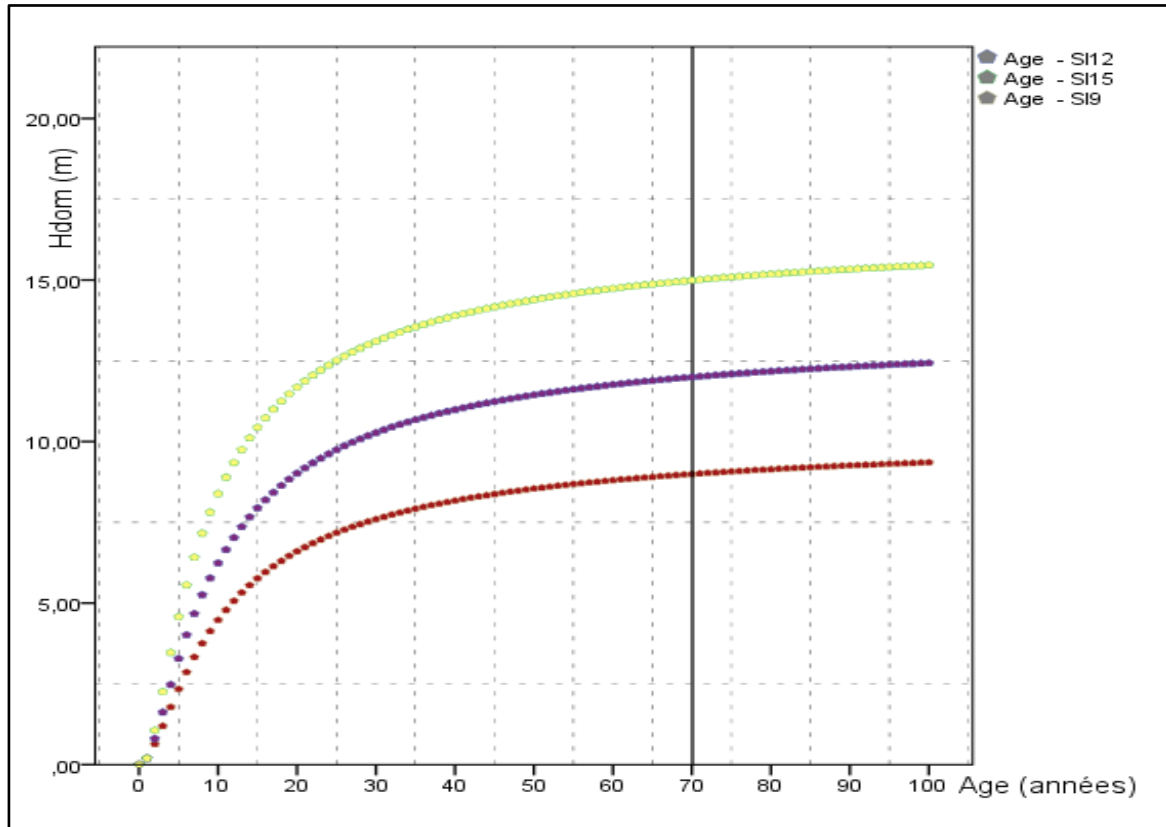


Figure 26. Courbes de croissance en hauteur dominante du pin pignon (modèle dynamique)

5.3. Modèle avec variables de site

5.3.1. Sélection des variables de site

Le tableau ci-après présente la matrice de corrélation entre les variables de site et le site index

Tableau 27. La matrice de corrélation entres les variables de site et le site index.

Variables de site		Site Index
Corrélation	Altitude (m)	0.653
	Pente (%)	0.308
	Profondeur du sol (m)	0.526
	Exposition	-0.006

Le tableau 27 montre que la corrélation entre le site index et les variables de site n'est pas très forte. Les variables altitude, profondeur du sol et pente ont toutes une relation positive avec le site index. Seule l'exposition a exprimé une corrélation inverse avec ce dernier.

Seules les deux variables présentant la plus forte corrélation présentées dans le tableau 27 ont été incluses dans le modèle, l'altitude et la profondeur du sol.

Ainsi, le modificateur du paramètre à estimer a pris la structure présentée comme suit :

$$\text{Modif} = a_1 * \text{Alt} + a_2 + a_3 * \text{prof sol} + a_4$$

Les valeurs d'entrée des variables de sites (altitude et profondeur du sol) pour le modèle ont été obtenues à partir des équations linéaires suivantes :

$$\text{Modif} = 0.0111 * \text{Alt} + 9.1627$$

$$\text{Modif} = 5.7653 * \text{Prof sol} + 9.1098$$

5.3.2. Paramètres d'ajustement du modèle avec variables de site

Le tableau suivant présente les résultats de l'équation tenant compte des variables de site ajustée à l'aide du modèle en utilisant le modèle de base et le modèle dynamique.

Tableau 28. Comparaison entre les paramètres d'ajustement des modèles avec et sans variables de site.

Modèle	Variable ajoutée au paramètre	Paramètres d'ajustement				Signification
		R ²	CMR	EAM	AIC	
Modèle de base		0.870	0.736	0.670	-7.048	0.722
Modèle de base avec variables de site	a	-0.631	9.200	2.458	72.065	0.102
	b	0.784	1.210	0.874	8.784	0.726
	c	0.841	0.894	0.736	-0.810	0.727
Modèle dynamique (G6)		0.870	0.731	0.667	-7.093	0.732
Modèle dynamique avec variables de site	b ₁	0.866	0.750	0.689	-6.319	0.740
	b ₂	0.845	0.870	0.761	-1.665	0.687

Quatre variables ont été testées pour être incluses dans les modèles avec variables de site. Cependant, en raison de la corrélation des ensembles de données, nous n'avons pu utiliser que la profondeur du sol et l'altitude qui ont des corrélations plus élevées avec le site index.

L'incorporation des variables de site dans le paramètre b₁ du modèle dynamique a permis d'obtenir de meilleures estimations par rapport aux autres combinaisons. Le modèle a fourni

un niveau de signification supérieur au modèle dynamique, mais avec des réductions minimales dans les valeurs d'ajustement. Selon le tableau 28, par rapport à l'équation dynamique sans variables de site, une réduction de 0.4 %, 0,019 m, 0.022 m et 0.774 m ont été obtenues dans le R^2 , CMR, l'EAM et l'AIC respectivement.

5.4. Comparaison entre modèles de base et dynamique

5.4.1. Comparaison entre les paramètres d'ajustement

L'évaluation des statistiques d'ajustement et l'analyse des résidus des deux modèles révèlent que les deux modèles sont très proches (tableaux 21 et 25). Les résultats indiquent que l'équation dynamique (G6) développée par l'approche GADA a la meilleure capacité de prédiction par rapport au modèle de base, mais avec des différences minimales aux niveaux de CMR, EAM, AIC et le degré de signification, tandis que le coefficient de détermination R^2 reste le même.

5.4.2. Comparaison entre les courbes de croissance du modèle de base et celles du modèle dynamique

Les courbes de croissance obtenues à partir du modèle dynamique ont été comparées avec les courbes de croissance du modèle de base (figure 27). Pour la classe inférieure ($I_0=9$ m) étaient similaires, alors que les courbes de la classe moyenne ($I_0=12$ m) étaient plus ou moins différentes dans les catégories d'âge les plus jeunes et identiques dans les catégories d'âge les plus avancées. Les courbes de la classe moyenne ont connu des dérives plus faibles par rapport à la classe supérieure ($I_0=15$ m). Pour le modèle dynamique, la trajectoire de la classe supérieure montre que la croissance en hauteur des jeunes peuplements est considérablement plus rapide que ce qui est constaté selon le modèle de base où les différences ont été observées en particulier dans les catégories d'âges les plus jeunes.

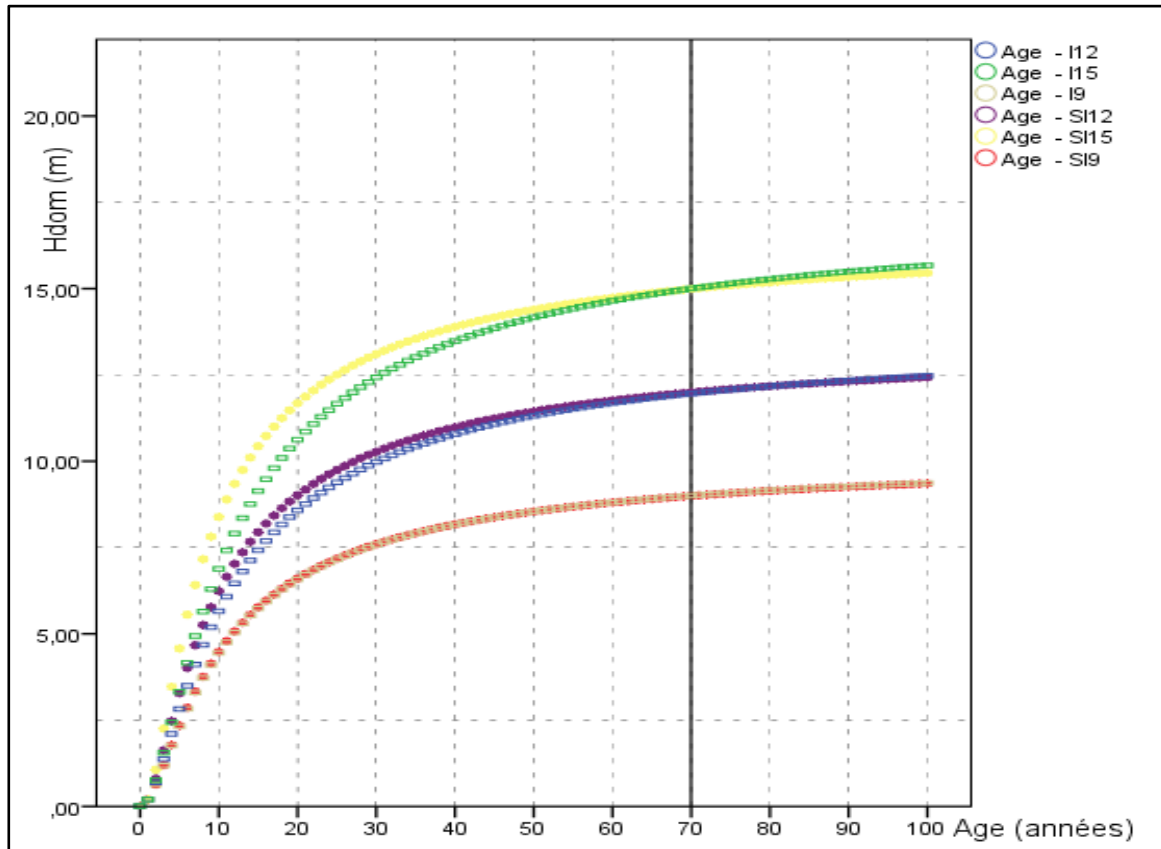


Figure 27. Courbes de croissance en hauteur issues du modèle de base (I) par rapport à celles obtenues à partir du modèle dynamique (SI).

5.4.3. Comparaison entre les accroissements moyens annuels du modèle de base et ceux du modèle dynamique

Dans la figure 28, les accroissements moyens annuels (AMA), des prédictions de hauteur dominante par le modèle dynamique et le modèle de base pour le pin pignon sont présentés pour examiner les tendances de croissance de la hauteur dominante par an. Lorsque l'on examine ces deux graphiques, les AMA de la hauteur ont commencé par de petites valeurs, puis ont augmenté jusqu'à une valeur maximale et ont diminué lentement à un âge plus avancé. En analysant les graphiques, on peut déterminer la relation entre les âges du point de pic de ces courbes, également appelé point d'inflexion, et les valeurs de site index pour l'espèce étudiée.

Dans ces relations, les âges au moment d'atteindre le point d'inflexion étaient en baisse avec les valeurs de site index; cependant, les valeurs des AMA au point d'inflexion étaient en hausse avec les valeurs de site index les plus élevées pour le pin pignon. Par exemple, le point d'inflexion de la meilleure classe, $I_0 = 15$ m, avait un AMA de 0.925 m à un âge de 6 ans pour le modèle dynamique et un AMA de 0.705 m à un âge de 8 ans pour le modèle de base, alors

que la classe inférieure, $I_0 = 9$ m, avait un AMA de 0.476 et de 0.471 m à un âge de 6 ans pour les deux modèles dynamique et de base respectivement. Le modèle dynamique a présenté des valeurs de point d'inflexion plus ou moins élevées par rapport au modèle de base.

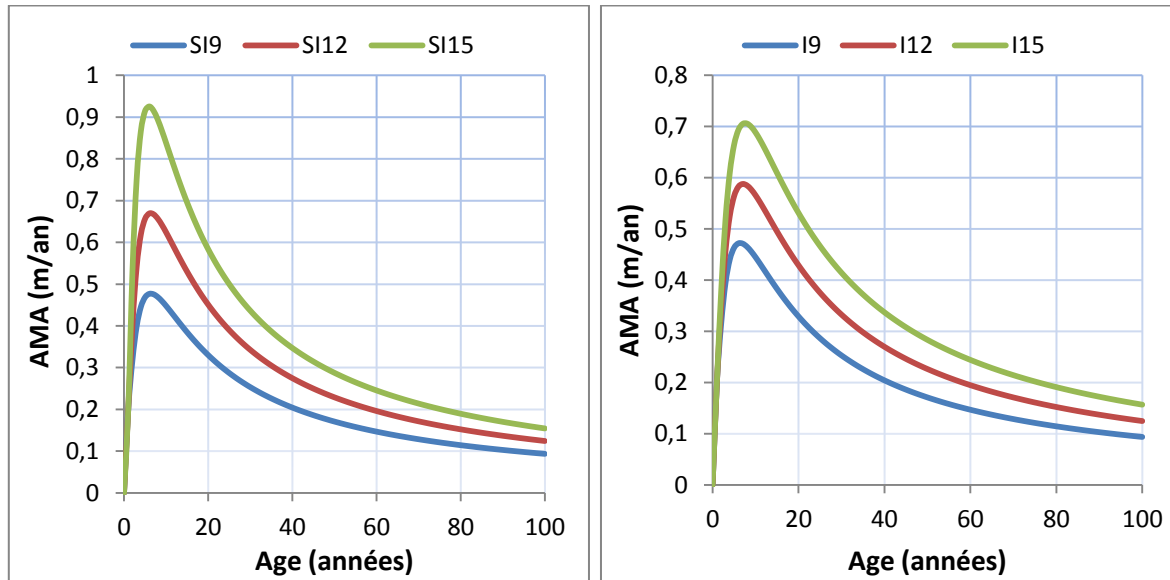


Figure 28. Les accroissements moyens annuels calculés sur la base du modèle dynamique (gauche) et du modèle de base (droite)

5.5. Comparaison des résultats obtenus avec les autres études

En l'absence d'autres modèles existants pour le pin pignon en Algérie, nous allons comparer nos résultats avec ceux obtenus en Tunisie par Sghaier et al (2012), en Espagne par Calama et al (2003) dans différentes régions d'Espagne et Piqué (2003) en Catalogne.

Sghaier et al (2012) ont utilisé le modèle de Lundqvist-Korf ajusté avec l'approche des différences algébriques généralisées (GADA), ont également défini 4 classes de qualité de site avec des hauteurs atteignant respectivement 15, 12, 9 et 6 m à un âge de référence de 30 ans. Alors que Calama et al (2003) et Piqué (2003) ont sélectionné le modèle de Bailey-Clutter ajusté avec l'approche des différences algébriques (ADA) déterminant aussi 4 classes de fertilité avec des hauteurs arrivant respectivement 21, 17, 13 et 9 m à 100 ans. La figure présente les trajectoires des hauteurs dominantes observées au cours du temps pour les trois modèles.

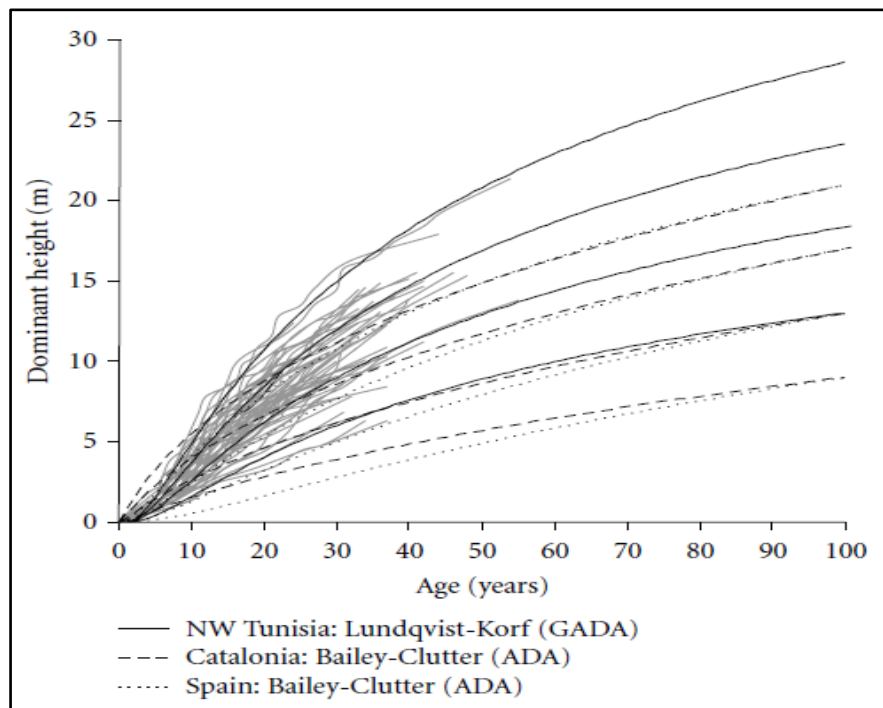


Figure 29. Courbes de croissance de pin pignon de trois modèles présentés par Sghaier et al (2012), Piqué (2003) et Calama et al (2003).

Aux âges les plus jeunes, les courbes de croissance de la région de Mostaganem sont caractérisées par un taux de croissance élevé. Ceci est également en accord avec les résultats obtenus par Piqué (2003) et Sghair et al (2012), tandis que les courbes obtenues par Calama et al (2003) sont définies par un taux de croissance faible.

Aux âges plus avancés, les tendances de croissance de notre modèle ont diminué progressivement. Ce résultat est en concordance à ceux de Piqué (2003) et Calama et al (2003) qui ont été assez similaires, au contraire le modèle tunisien a présenté des asymptotes plus élevées.

Le pin pignon peut atteindre 20 m de hauteur, alors que la hauteur maximale observée dans la zone d'étude était de 15.5 m à un âge de 100 ans. Cette dernière a été utilisée comme référence pour évaluer le comportement asymptotique des modèles sélectionnés dans notre cas. Pour cette estimation, une valeur comprise entre 15.5 et 20 m a été considérée comme adéquate, même si le modèle présentait une asymptote maximale au-dessus de ce point. Les deux modèles ont prédit des asymptotes de 19.398 m et 18.458 m pour le modèle de base et le modèle dynamique respectivement. Ces deux valeurs sont très faibles par rapport à celle mentionnée par Sghaier et al (2012) qui est d'environ de 37 m.

D'une manière générale, les deux modèles choisis dans notre étude, possèdent les caractéristiques typiques d'un modèle de rendement biologique, qui sont les suivantes : il

commence au point zéro ; présente une croissance accélérée aux âges plus jeunes ; présente un point d'inflexion où la croissance ralentit ; et comprend une asymptote qui reflète la valeur maximale pouvant être obtenue par l'organisme.

6. Production fruitière des peuplements étudiés

Le pin pignon (*Pinus pinea* L.) est une espèce bien connue pour la haute valeur nutritionnelle de ses noix comestibles, étant une bonne source de graisses insaturées de haute qualité, de protéines, de vitamines, de minéraux et de composés bioactifs (Bolling et al., 2011 ; Evaristo et al., 2013). Selon Gordo et al. (2012), la qualité des cônes est liée à la taille et au poids des cônes, car les cônes plus gros sont associés à un nombre plus élevé de graines, à un rendement plus élevé et à des pignons plus gros. Ainsi, la production de pignons dépend de trois variables principales : le nombre de cônes, le poids des cônes et le rendement en pignons (pourcentage du poids total des pignons par rapport au poids des cônes). L'importance des études sur la variabilité des fruits, en particulier de celles qui se concentrent sur le rendement des cônes en pignons, s'est accrue en raison de la présence croissante de graines vides et endommagées (Mutke et al., 2014). Ce phénomène a été attribué aux dommages associés à l'augmentation des sécheresses ou aux changements phénologiques dus au changement climatique, ainsi les cônes sains peuvent contenir jusqu'à 50 % de graines vides (Mutke et al., 2014).

Les principaux objectifs de cette partie sont d'évaluer les traits morphométriques des fruits afin de déterminer la variabilité spatiale et d'identifier les caractéristiques des fruits qui ont un impact sur le rendement en pignons.

6.1. Caractéristiques des fruits du pin pignon des peuplements étudiés

Les caractéristiques des fruits du pin pignon des différentes placettes étudiées sont résumées dans le tableau ci-après.

Tableau 29. Caractéristiques des fruits du pin pignon des placettes étudiées.

Caractéristiques	Minimum	Maximum	Moyenne	Coefficient de variation CV (%)
Cône				
Nombre moyen de cônes/arbre NC (N°)	17	49	35.51	24.27
Poids du cône PC (g)	208.1	534.2	398.21	22.75
Longueur du cône LC (cm)	10	12	11.08	5.85
Diamètre du cône DC (cm)	7.3	9.9	8.62	8.64
Graine				
Nombre moyen de graines/cône NG (N°)	52.03	120	94.03	19.24
Poids de la graine PG (g)	0.6	1.18	0.77	15.62
Rendement en graines RG (%)	14.28	19.94	18.13	7.81
Pignon				
Nombre moyen de pignons/cône NP (N°)	45.33	111.9	85.02	20.46
Poids de pignon PP (g)	0.13	0.20	0.17	11.59
Rendement en pignons RP (%)	2.38	4.1	3.59	9.76

Le rendement en pignons, qui comprend le poids des pignons (PP) et le nombre des pignons par cône (NP), ainsi que le poids des cônes (PC) en tant que composantes, était moyen dans toutes les plantations, allant de 2.38 à 4.1 % (tableau 29). Les cônes les plus lourds et les plus gros ont été enregistrés dans les peuplements de Belhacel, alors que le nombre de graines et de pignon par cône le plus élevé a été noté dans les peuplements de Bouachria. Les poids moyens des graines et des pignons sont plus ou moins similaires dans les différents peuplements étudiés.

Les pourcentages du rendement en graines (RG) et en pignons (RP) ont été plus ou moins homogènes. Cette homogénéité est affirmée par les valeurs faibles du coefficient de variation (7.81 et 9.76 %) progressivement. La valeur du CV la plus élevée est celle du nombre moyen de cônes par arbre (NC) avec 24.27 %. D'autre part, la valeur de la longueur du cône (LC) était la plus faible avec 5.85 %.

6.2. Corrélation entre les caractéristiques des fruits de l'espèce étudiée

La corrélation des caractéristiques des fruits du pin pignon des différentes plantations étudiées est illustrée dans le tableau suivant.

Tableau 30. Corrélation des caractéristiques des fruits de l'espèce étudiée.

Corrélation	NC	PC	LC	DC	NG	PG	RG	NP	PP
PC	0.596								
LC	0.504	0.687							
DC	0.572	0.685	0.941						
NG	0.650	0.822	0.719	0.726					
PG	0.228	0.671	0.301	0.288	0.221				
RG	0.255	0.359	0.288	0.267	0.434	0.503			
NP	0.572	0.838	0.749	0.755	0.855	0.430	0.426		
PP	0.233	0.677	0.239	0.218	0.324	0.850	0.498	0.360	
RP	0.048	0.185	0.194	0.172	0.186	0.349	0.616	0.493	0.350

L'analyse de corrélation a montré que toutes les caractéristiques des fruits étaient positivement corrélées. La corrélation la plus élevée était entre les deux paramètres de taille longueur et diamètre des cônes (LC et DC), parallèlement la corrélation la plus faible était entre le nombre moyen de cônes par arbre et le rendement en pignons. Les nombres moyens de graines et de pignons (NG et NP) étaient significativement corrélés au poids moyen et la taille des cônes (PC, LC et DC).

6.3. Relation entre la production fruitière et les paramètres dendrométriques du pin pignon

Afin d'explorer les relations et les corrélations entre les caractéristiques des fruits et les paramètres dendrométriques, des corrélations partielles ont été disposées pour l'ensemble des données où le nombre moyen de cônes par arbre a donné les corrélations les plus pertinentes avec les paramètres dendrométriques (voir l'annexe 2).

L'âge et la circonférence moyenne étaient des bons prédicteurs du nombre de cônes par arbre représentant une corrélation similaire ($r = 0.886$), mais peu significative à l'égard de la hauteur de houppier et la hauteur totale moyenne ($r = 0.913$ et $r = 0.904$, respectivement) (voir l'annexe 2).

D'une manière générale le statut social des arbres a eu un effet significatif sur le nombre de cônes et un peu plus ou moins sur le poids moyen de cônes, la taille des cônes et le nombre moyen de graines et pignons par cône. Les arbres les plus grands ou dominants produisant plus de cônes que les arbres co-dominés et dominés.

6.3.1. Relation entre le nombre moyen de cônes par arbre et la hauteur moyenne et diamètre moyen de houppier

Le pin pignon a présenté une production moyenne de cônes dans la zone d'étude avec un nombre moyen allant de 17 à 49 cônes par arbre. La moyenne du nombre moyen de cônes était de 36 par arbre (tableau 29). La figure suivante exprime la relation entre le nombre moyen de cônes par arbre et la hauteur moyenne et diamètre moyen de houppier

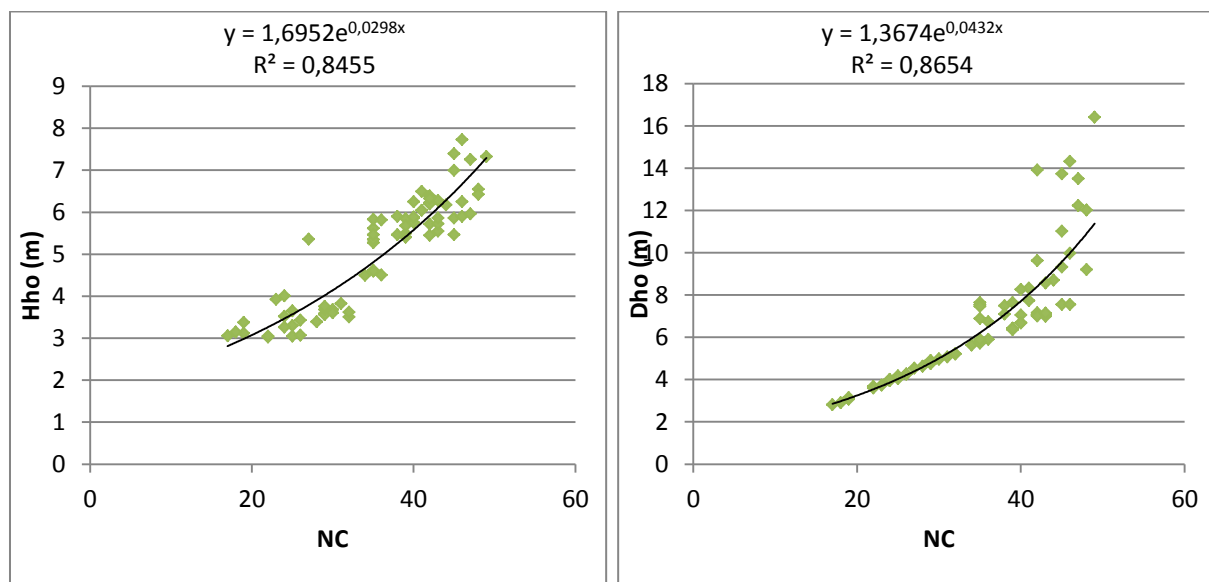


Figure 30. Relation entre le nombre moyen de cônes par arbre et la hauteur moyenne et diamètre moyen de houppier

Le nombre moyen de cônes de deux et trois ans étaient positivement et significativement corrélé à la hauteur et au diamètre de houppier ou l'équation exponentiel a signifié le coefficient de détermination le plus élevé ($R^2 = 0.84$ et $R^2 = 0.86$, respectivement).

Les hauteurs et les diamètres élevés de houppier présentaient des valeurs élevées de nombre moyen de cônes par arbre, tandis que les hauteurs et diamètres inférieurs d'houppier sont traduits par des faibles valeurs de nombre moyen de cônes.

6.3.2. Relation entre le nombre moyen de cônes par arbre et la hauteur moyenne et dominante de l'espèce étudiée

Les hauteurs moyennes et dominantes d'un peuplement forestier indiquent son potentiel de croissance et d'évolution. La figure 31 révèle la relation entre le nombre moyen de cônes par arbre et la hauteur moyenne et dominante de l'espèce étudiée.

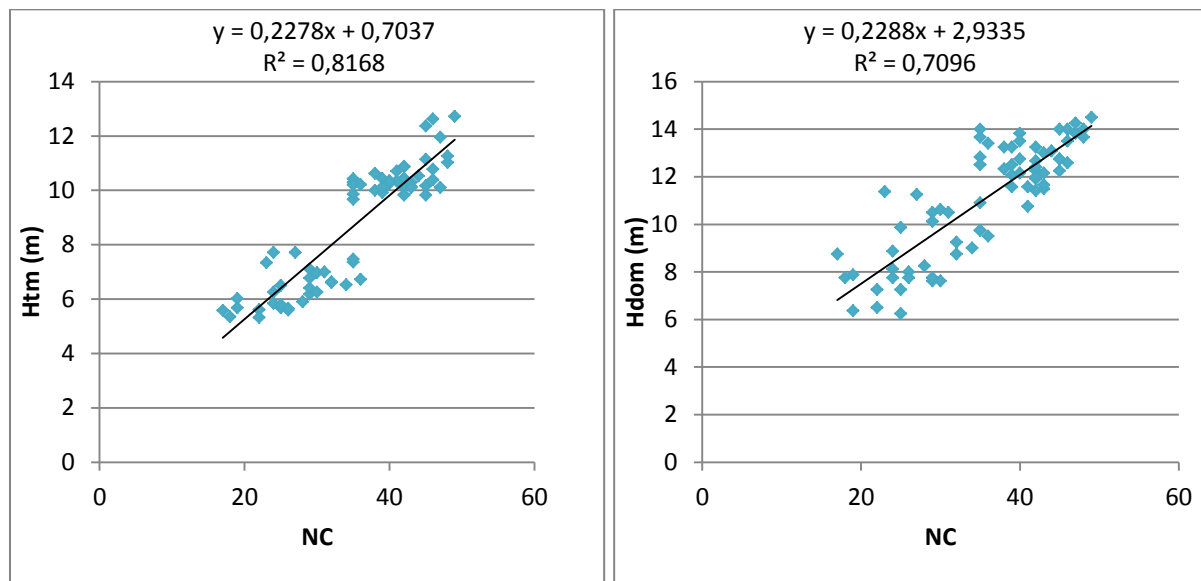


Figure 31. Relation entre le nombre moyen de cônes par arbre et la hauteur moyenne et dominante de l'espèce étudiée.

L'ajustement linéaire entre le nombre moyen de cônes par arbre et les hauteurs moyennes et dominantes a permis de représenter une corrélation positive et significative. Cette relation est confirmée par la valeur élevée du coefficient de détermination (R^2) qui s'étale de 0.70 à 0.81 respectivement pour la relation (NP-Hdom et NP-Htm) et par la répartition équitable de part et d'autre des hauteurs moyennes et dominantes de toutes les placettes étudiées.

6.3.3. Relation entre le nombre moyen de cônes par arbre et les circonférences moyennes à 1.30 m et dominantes de l'espèce étudiée

Les circonférences moyennes et dominantes sont des bons indicateurs de productivité des peuplements. La figure 32 illustre les relations entre le nombre moyen de cônes par arbre et la circonférence moyenne à 1.30 m et dominante de pin pignon.

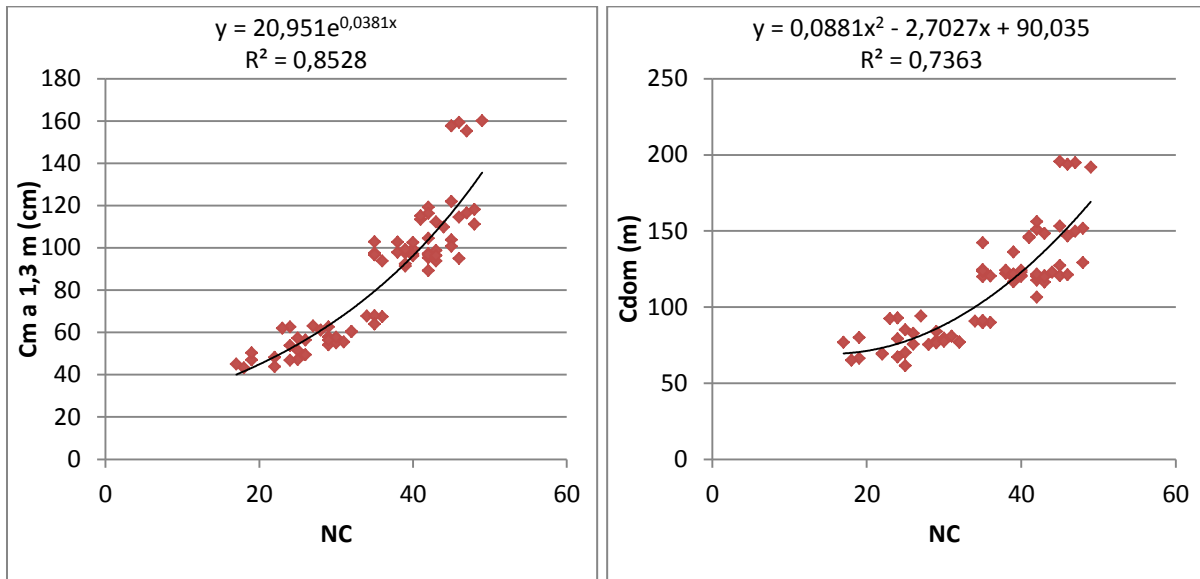


Figure 32. Relation entre le nombre moyen de cônes par arbre et la circonférence moyenne à 1.30 m et dominante de l'espèce étudiée.

La présentation graphique montre une corrélation positive entre le nombre moyen de cônes par arbre et la circonférence moyenne à 1.30 m et dominante des différentes plantations. Le coefficient de détermination le plus élevé pour la circonférence moyenne à 1.30 m ($R^2 = 0.85$) est ajusté par une équation exponentielle, alors que l'équation polynomiale a donné le coefficient le plus élevé pour la circonférence dominante ($R^2 = 0.73$).

6.3.4. Relation entre le nombre moyen de cônes par arbre et les deux paramètres, nombre de tige par hectare et surface terrière

La densité et la surface terrière sont des mesures importantes en matière de planification et gestion forestière. La figure suivante représente la relation entre le nombre moyen de cônes par arbre et les deux paramètres, nombre de tiges par hectare et surface terrière.

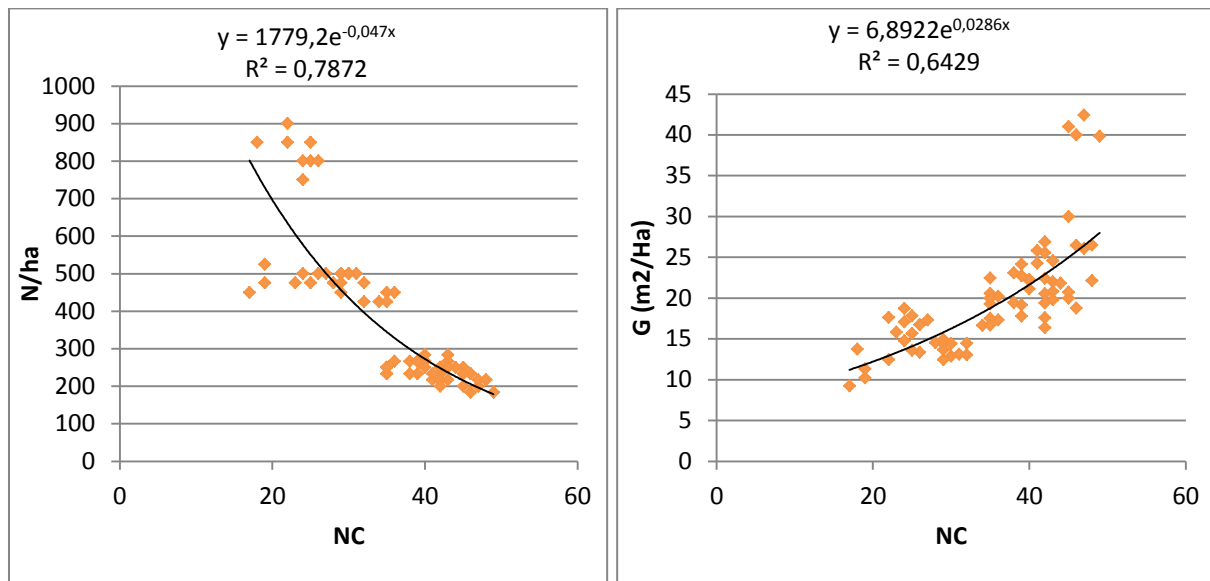


Figure 33. Relation entre le nombre moyen de cônes par arbre et les deux paramètres, nombre de tiges par hectare et surface terrière.

La relation entre le nombre moyen de cônes par arbre et les deux paramètres, densité (N/ha) et surface terrière (G) sont ajustée par une régression significative dont les équations sont de type exponentiel pour les deux relations.

Les résultats ont montré une corrélation négative entre le NC et N/ha. Le nombre de cônes a diminué de manière significative avec l'augmentation de la densité des peuplements ($R^2 = 0,78$). Le nombre maximal de cônes par arbre était dans la placette la plus clairsemée.

La production de cônes par arbre augmente avec la surface terrière, mais la corrélation entre ces deux derniers est moyennement significative par rapport aux autres paramètres.

6.4. Influence des facteurs écologiques sur la production fruitière

L'affinité des différentes variables étudiées est confirmée par l'analyse en composantes principales (ACP), par la mise en évidence l'influence des paramètres écologiques (profondeur du sol, altitude, exposition et pente) sur les caractéristiques des fruits de Pin pignon dans la région d'étude. Le tableau suivant représente la matrice de corrélation entre les différentes variables écologiques et les caractéristiques des fruits.

Tableau 31. La matrice de corrélation entre les paramètres écologiques et les caractéristiques des fruits de pin pignon.

Corrélation	Altitude (m)	Pente (%)	Profondeur du sol (m)	Exposition
NC	0.608	0.338	0.722	0.173
PC	0.507	0.388	0.460	0.097
LC	0.377	0.153	0.358	0.193
DC	0.421	0.166	0.440	0.251
NG	0.518	0.327	0.460	0.072
PG	0.162	0.162	0.275	0.174
RG	0.035	0.002	0.272	0.201
NP	0.461	0.286	0.454	0.169
PP	0.173	0.182	0.216	0.073
RP	-0.048	-0.089	0.120	0.206

En effet, toutes les variables étaient positivement corrélées sauf la corrélation entre le rendement des cônes en pignons (RP) et les deux paramètres écologiques altitude et pente était négative. La corrélation entre les deux paramètres écologiques profondeur du sol et altitude et les caractéristiques des fruits est également moyenne, tandis qu'il y a peu de corrélation entre les caractéristiques des fruits et les deux variables, exposition et pente.

La corrélation entre le nombre moyen de cônes par arbre et les deux paramètres écologiques profondeur du sol et altitude est plus importante par rapport aux autres variables ($r = 0.722$ et $r = 0.608$) respectivement. Cela confirme l'influence de la profondeur du sol et l'altitude sur la production quantitative des fruits de l'espèce étudiée.

La figure 34 illustre le cercle de corrélation entre les facteurs écologiques et les caractéristiques des fruits de pin pignon.

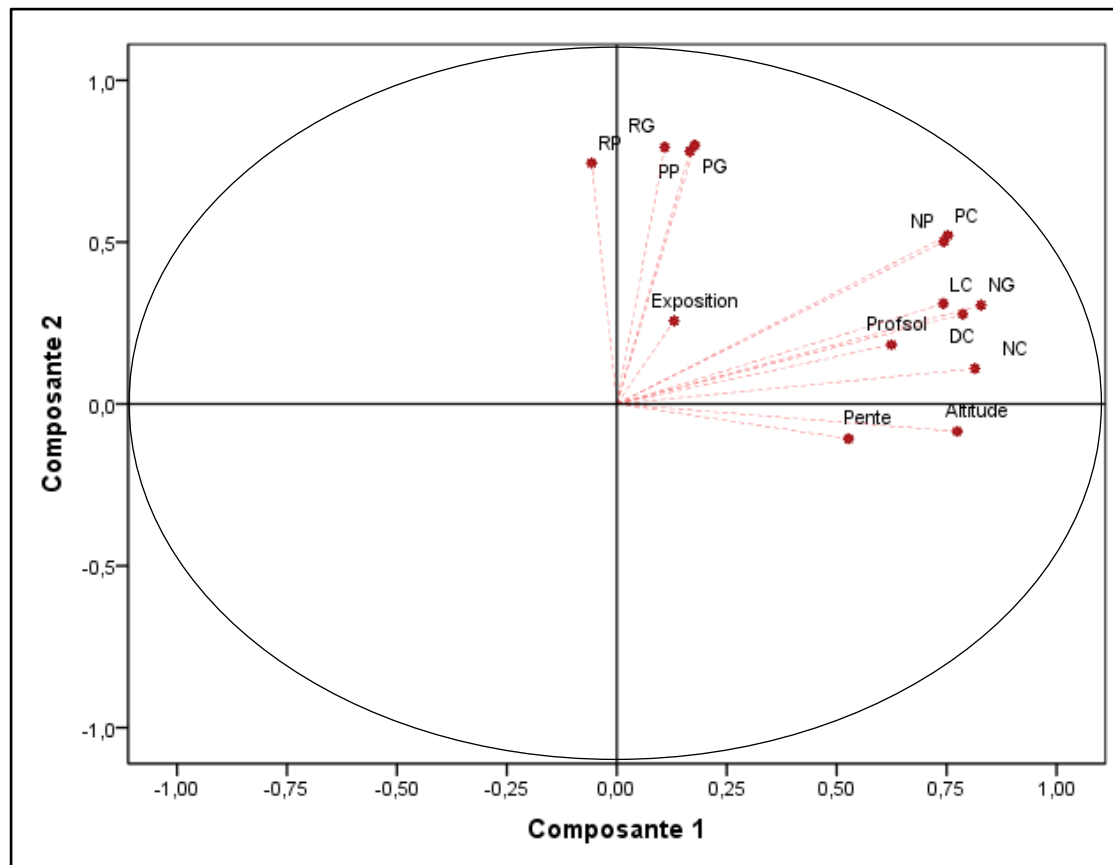


Figure 34. Cercle de corrélation entre les variables écologiques et les caractéristiques des fruits de pin pignon.

La représentation graphique des 14 variables à l'intérieur du cercle de corrélation sur les plans factoriels 1 et 2 permet de donner une interprétation physique à certaines composantes principales. L'axe 1 qui contient à lui seul 83,6 % de l'information est représenté par la totalité des variables sauf le rendement en pignons qui représente l'axe 2 avec 5,49 % de l'information. Cette dernière variable et le rendement en graines étaient les moins corrélées avec les variables écologiques.

6.5. Etat sanitaire des cônes

Durant notre échantillonnage nous avons remarqué des dommages au niveau des cônes surtout les cônes de deux ans. Les dommages sont présentés par une couleur brune et des trous circulaires. Ces deux symptômes sont dus probablement par deux insectes tels que *Pissodes validirostris* Gyll qui provoque la destruction des cônes ou *Dioryctria mendacella* Stgr qui s'attaque aux cônes en début du développement de 2e année.

6.6. Comparaison des résultats obtenus avec les autres études

Le poids des cônes, un attribut de qualité important dans la plupart des cultures fruitières (Wetzstein et al., 2011), a atteint une valeur moyenne (398.21 g), En effet, la valeur moyenne du poids des cônes dans la zone d'étude est en accord avec celle enregistrée dans le bassin méditerranéen comme la Tunisie (Adili, 2012), le Portugal (Evaristo et al., 2008 ; Gonçalves et Pommerening, 2012) et l'Espagne (Gordo et al., 2012 ; Mutke et al., 2012). Cependant, cette valeur est très faible par rapport à la valeur marquée au Chili (521 g) (Loewe et al., 2019). Le poids des cônes a exprimé des corrélations positives et importantes avec le nombre moyen en graines et en pignons. Ainsi, les cônes les plus lourds et de grandes tailles (LC et DC) contiennent un plus grand nombre de graines et de pignons. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus par Calama et Montero (2005) et Adili (2012). En moyenne, nous avons noté 94 graines et 85 pignons par cône, une valeur conforme aux valeurs rapportées en Italie (Ciancio et al., 1990), en Turquie (Bilir, 2009) et au Portugal (Evaristo et al. 2008 ; Calama et al. 2015) et faible par rapport à celle indiquée par Loewe et al (2019) au Chili avec 113 graines et 103 pignons par cône. Les plantations avec les cônes les plus lourds étaient également celles avec le poids de graines et de pignons le plus élevé, en accord avec Calama et al. (2015).

En ce qui concerne le rendement des cônes en graines, nous avons observé une moyenne de 18.13 % (allant de 14.28 à 19.94 %), inférieur à la valeur signalée au Portugal (19,2 %) (Silveira, 2012) et beaucoup plus faible à celle mentionnée par Ciancio et al (1990) en Italie (20 à 26 %). Dans la zone d'étude, nous avons trouvé un faible coefficient de variation (CV=7.81 %) du rendement en graines au sein des plantations. Ce résultat est opposé au résultat obtenu par Loewe et al (2019) avec un coefficient de variation de 61.5 %. Le RG est corrélé positivement au nombre et au poids des graines, comme l'ont indiqué Gordo et al (2012) et Loewe et al (2019).

Les valeurs du rendement des cônes en pignons RP de la région de Mostaganem (2.38 à 4.1 %) avec une moyenne de 3.59 % sont au moins égales aux (2.7 et 4.4 %) rapportés pour la région de Valladolid, en Espagne (Peruzzi et al., 1998), et inférieure à celles enregistrées au Chili, qui variaient entre 3.6 et 5 % (Loewe et al., 2019). La valeur moyenne du RP était plus ou moins supérieure à celles marquées ces dernières années au Portugal (1,7 %) (Evaristo et al. 2008) et dans la région de Meseta Norte (2.1 %) en Espagne (Calama et al., 2015). Cela pourrait être dû à l'absence des effets néfastes provoqués par la punaise américaine du pin (*Leptoglossus occidentalis* Heidemann) en zone d'étude jusqu'à présent, alors que les résultats

élevés signalés au Chili pourraient être dus aux caractéristiques climatiques adéquates, en particulier le faible déficit hydrique (Loewe et al., 2016).

Les corrélations entre les caractéristiques des fruits et les mesures dendrométriques des peuplements étudiés ont mis en évidence que les plus grands arbres, avec des diamètres et hauteurs de houppier importants, des hauteurs moyennes et dominantes élevées, des circonférences moyennes et dominantes supérieures et se trouvant dans des peuplements à faible densité d'arbres, ont produit plus de cônes que les plus petits arbres. Ces résultats sont dans la lignée de ceux de Gonçalves et Pommerening (2011) qui ont montré une bonne corrélation entre le diamètre de houppier et la production de cônes et ceux d'Adili (2012) qui ont indiqué que le volume de la couronne est le principal facteur influençant la production de cônes chez le pin pignon. Plusieurs études dans différents pays, soit : en Tunisie (Adili, 2012) et en Espagne (Calama et al., 2011), ont également expliqué la variabilité spatiale de la production de cônes entre les arbres et entre les placettes de pins pignon comme dans la présente étude par l'existence de grands arbres poussant dans des peuplements à faible densité avec la meilleure qualité de site.

Conclusion

Generale

Conclusion générale

Dans cette recherche, nous avons étudié les caractéristiques dendrométriques, fructifères et écologiques des peuplements équiennes de pin pignon (*Pinus pinea* L) dans la région de Mostaganem, à partir de 72 placettes échantillons temporaires (1 151 arbres) réparties en quatre plantations : Akboub (Belhacel), Bouachria, Ain Brahim et Stidia.

L'analyse des résultats des différents paramètres dendrométriques pour la région de Mostaganem a montré que les peuplements étudiés sont réguliers. Cette régularité est caractérisée par la répartition du nombre de tiges par catégorie de circonférence à 1.30 m.

L'évolution de la hauteur totale en fonction de la circonférence à 1.30 m des placettes étudiées confirme la relation unique entre ces deux paramètres. Les relations CD/diamètre à 1.30 m et CD moyen/diamètre moyen à 1.30 m des placettes étudiées sont caractérisées par des coefficients de détermination élevés (supérieurs à 0.8). Les corrélations entre la surface terrière et les deux diamètres, notamment le diamètre du tronc à 1.30 m et le diamètre de houppier, sont positives et significatives.

Ces relations entre les caractéristiques dendrométriques sont de bons indicateurs de productivité pour les peuplements étudiés.

Afin de mieux comprendre la productivité du pin pignon, nous avons utilisé les résultats de l'ACP qui regroupe les paramètres dendrométriques en fonction des facteurs écologiques (qualité des placettes étudiées). Ces deux derniers sont positivement corrélés entre eux. Cette corrélation est confirmée par la composante principale 1 qui explique à elle seule 99 % de la variance. L'ACP a montré que le paramètre profondeur du sol a une forte influence sur la productivité du pin pignon, notamment sur la circonférence moyenne des placettes étudiées. De plus, l'altitude est également responsable de cette productivité, puisqu'il a été remarqué que les placettes situées à des altitudes supérieures sont les plus productives, particulièrement en hauteur et en circonférence.

L'absence d'influence de la pente sur les paramètres dendrométriques est probablement due au fait que 68 % des placettes étudiées sont caractérisées par une classe de pente inférieure ou égale à 8 % ; cette classe est relativement plate et correspond aux plaines, aux terrasses alluviales et aux replats structuraux. Les 32 % de placettes restantes ont une topographie plus ou moins accentuée avec une classe de pente supérieure à 8 %, représentant les piémonts, les glacis et les collines. Dans la zone d'étude, il n'y a pas de relation entre l'exposition et les paramètres dendrométriques, la majorité des placettes étant exposées au nord (31.94 % des placettes), au nord-est (20.83 % des placettes) et au nord-ouest (19.44 % des placettes).

La seconde partie du travail entrepris dans le cadre de cette recherche à concerner la modélisation, la méthode utilisée a eu pour but essentiel la construction d'un modèle de croissance du pin pignon dans la région de Mostaganem.

L'exploitation des données recueillies a permis de tracer les courbes de croissance spécifiques au pin pignon dans la zone d'étude et de construire plusieurs modèles (modèle de base, modèle dynamique et modèle avec variables de site) reconstituants l'évolution de la hauteur dominante en fonction du temps.

L'évaluation des statistiques d'ajustement et l'analyse des résidus des différents modèles montrent que le modèle dynamique (G6) de l'approche GADA développé par Cieszewski (2004) à la meilleure capacité de prédiction, il a donc été adopté pour la modélisation de la croissance de la hauteur dominante et a abouti à l'étagement de la pinède étudiée en trois classes de productivité d'amplitude égale à 3 m à l'âge de référence de 70 ans. Les classes sont :

- Première classe de meilleure productivité avec 15 m
- Deuxième classe de moyenne productivité avec 12 m
- Troisième classe de faible productivité avec 9 m.

Les classes de productivité déterminées ont été comparées avec ceux trouvées en Tunisie par Sghaier et al (2012), en Espagne par Calama et al (2003) dans différentes régions d'Espagne et Piqué (2003) en Catalogne. La confrontation des résultats montre que le pin pignon de la région de Mostaganem présente une croissance moyenne caractérisée par un taux de croissance élevé aux âges les plus jeunes jusqu'à un point d'inflexion où la croissance ralentit progressivement aux âges plus avancés.

Les résultats de cette étude ont montré que le nombre moyen de cônes par arbre est un caractère clé dans la détermination de la production fruitière du pin pignon dans la région de Mostaganem. Cela est confirmé par les relations significatives et les fortes corrélations entre le nombre de cônes et les caractéristiques dendrométriques et écologiques des placettes d'étude.

Le rapport entre le rendement en cônes et en pignons, une caractéristique commerciale importante de la culture du pin pignon, varie de 2.38 à 4.1 % dans la zone d'étude, valeurs moyennes que les valeurs rapportées dans les principaux pays producteurs de pignons. Le caractère du fruit le plus important dans la détermination de nombres moyens de graines et de pignons (NG et NP) est le poids moyen et la taille des cônes (PC, LC et DC).

La corrélation entre les paramètres écologiques et les caractéristiques des fruits est généralement moyenne à faible, dans lequel la corrélation la plus importante est notée entre le nombre moyen de cônes par arbre et les deux paramètres écologiques profondeur du sol et altitude.

Ces dernières années, les incendies ont constitué la menace la plus sérieuse pour la richesse forestière en Algérie en général et dans l'ouest du pays en particulier, mais d'autres problèmes importants, le surpâturage et la récolte illicite (bois et cônes) dont souffrent les peuplements de pin pignon sont également présents. Face à cette situation, il est nécessaire de mettre en œuvre une stratégie durable de conservation et de protection des peuplements de pin pignon, qui devrait s'appuyer sur les actions suivantes :

- **L'aménagement anti-incendie** : qui se base essentiellement sur :

- a) Tranchées pare feu : sont des obstacles pour empêcher la propagation des incendies, le plus souvent situés aux interfaces forêt/zone d'activités humaines ou implantées selon la ligne des plus grandes pentes ou sur les crêtes, possèdent une superficie de 2.5 ha pour 100 ha de forêt et une largeur minimale de 20 m pour permettre le déplacement et les interventions de lutte.
- b) Pistes forestières : sont des équipements de 1 kilomètre de piste pour 50 ha de forêt. Elles permettent le déplacement et la lutte à l'intérieur d'un massif forestier.
- c) Points d'eau : sont des équipements très importants qui doivent être en nombre suffisant (01 point d'eau pour 1000 ha de forêts) et bien réparties pour réduire les distances et les durées de ravitaillement afin d'optimiser les interventions sur le feu.
- d) Poste de vigie : pour arriver à contenter les besoins en poste de vigie, il est important d'étudier la région afin de pouvoir délimiter les zones devant être couvertes par le réseau. Cette délimitation résulte de la synthèse de différentes études de cartographie des risques d'incendie (aléa, vulnérabilité), Analyse de la difficulté de la lutte (topographie, éloignement des centres de secours, équipements DFCI...).

- **La mise en défens forestière** : surface réservée au rajeunissement des peuplements forestiers pendant un temps déterminé afin d'organiser les populations riveraines et de créer des projets socio-économiques collectifs qui génèrent des revenus en milieu rural.

- **Le sylvopastoralisme** : c'est-à-dire l'utilisation des forêts comme zone de pâturage pour le bétail ; mais s'il n'est pas contrôlé, le pâturage devient un facteur de régression et de risque par l'abrutissement de la régénération.

- **Les travaux de reboisement** : les travaux de reboisement sont nécessaires à la reconstitution des écosystèmes dégradés. Cette dégradation est très avancée dans la région de

Mostaganem, surtout dans les zones côtières. Le pin pignon mérite une place plus avancée dans les programmes de reboisement en Algérie en raison de son importance écologique (fixation des dunes littorales, lutte contre l'érosion, etc.) d'une part et économique (bois, pignons comestibles, etc.) d'autre part.

- **La sylviculture préventive** : l'objectif de cette action est d'obtenir une composition et une structure des peuplements permettant de contrer la propagation du feu, de limiter les dégâts causés aux arbres, de favoriser la croissance et d'améliorer la production de bois et de cônes.

Les caractéristiques et les particularités du pin pignon, bonnes performances sur les sols pauvres ou érodés, peu de ravageurs ou de maladies, besoin réduit de pratiques culturales telles que la taille, production de pignons et la forte résistance aux conditions climatiques telles que la sécheresse et les gelées extrêmes ou tardives en font un bon candidat aux systèmes agroforestiers.

Références bibliographiques

Références Bibliographique

- Abbas, H. (1986). La productivité des forêts de pin d'Alep dans le sud-est méditerranéen français. Analyses écodendrométriques. Options Méditerranéennes. Série Etude CIHEAM 86/1, 127-156.
- Abellanas, B. & Pardos, J.A. (1989). Seasonal development of female strobilus of stone pine (*Pinus pinea* L.). Ann. Sci. For. 46:51s-53s.
- 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.
- Agrimi, M. & Ciancio, O. (1993). Le pin pignon (*Pinus pinea* L.). Silva Mediterranea. FAO, Rome. <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/012/ak446f/ak446f00>.
- Alder, D. (1980). Estimation of volumes and growth of forest stands. Vol.2: Production studies and forecasts. Forest 22/2, Rome, FAO. <http://www.fao.org/3/a-ap354f.pdf>.
- Alexandrian, D. (1982). Pin pignon en forêt méditerranéenne. IV, n°2 pp 323-326.
- Amaro, A. Reed, D. Tomé, M. & Themido, I. (1998). Modeling dominant height growth: Eucalyptus plantations in Portugal. For Sci 44 (1):37-46.
- Angot, A. (1916). Traité élémentaire de météorologie. Edit Gauthier-Villars et Cie. Paris. 415 p.
- Assmann, E. (1956). Natürlicher Bestockungsgrad und Zuwachs. Forstwiss. Centralbl. 75, 257-265.
- Assmann, E. (1970). The principals of yield study. Oxford, Pergamon Press, 506 p.
- Avery, T.E. & Burkhart, H.E. (1994). Forest Measurements. 4th Ed (Boston, MA: McGraw-Hill, Inc).
- Avery, T.E. & Burkhart, H.E. (2002). Forest Measurements. 5th Ed. McGraw-Hill, New York.
- Badal, E. (2001). La recolección de pinàs durante la prehistoria en la Cueva de Nerja (Malaga). p. 101–104. In: V. Villaverde (ed.), De neandertales a cromañones -el inicio del poblamiento humano en las tierras valencianas. Universitat de Valencia, Spain.
- Bagnouls, F. & Gaussen, H. (1953). Saison sèche et indice xérothermique. Doc. Carte prote. veg. art.8. Toulouse, 47 p.
- Bailey, R.L. & Clutter, J.L. (1974). Base-Age Invariant Polymorphic Site Curves. For. ScL 20:155-159.

- Barbeito, I.S. (2009). Structure and natural regeneration in Iberian Pine forests implications for management. Thesis, Universidad Politecnica de Madrid. <https://oa.upm.es/7201/>.
- Baronio, P. & Butturini, A. (1988). Gli insetti nocivi al bosco. Monti e Boschi (Le schede) 39: 1-13.
- Barranco, J. & Ortunõ, S.F. (2004). Aproximacion al sector de pinon en Espania. Estudios Agrosociales Pesqueros 201:165–189.
- Bary-Lenger, A. Evrard, R. & Bathy, P. (1979). La forêt. Vaillant Carmine S. Imprimeur. Liège. 611 p.
- Battle, I. (2006). Pinaceae. *Pinus pinea*. Pine nut. p. 595–596. In: J. Janick and R.E. Paull (eds.), The Encyclopedia of Fruit and Nuts. CABIntl. Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- Baur, F. (1881). Die Rotbuche in Bezug auf Ertrag, Zuwachs und Form . Verlag von Paul Pare , Berlin.
- Bazile-Robert, E. (1981). Le pin pignon (*Pinus pinea* L.) dans le Würm récent de Provence. Geobios 14(3):395–397.
- Beal, D.J. (2005). SAS Code to Select the Best Multiple Linear Regression Model for Multivariate Data Using Information Criteria. Science Applications Internationale Corporation (SAIC), Tennessee, USA, 6 p.
- Belgat, S. (2001). Le littoral Algérien : Climatologie, géopédologie, syntaxonomie, édaphologie et relation sol-végétation. Thèse. Doct. Sci. Agr. I.N.A. El Harrach. 261 p.
- Belghazi, B., Ezzahiri, M. Romane, F. (2000). La productivité des forêts de pin d'Alep dans la forêt de Tamga (Haut Atlas marocain), Ecologia Mediterranea 4, pp. 521-529.
- Biging, G.S. & Wensel, L.C. (1985). Site index equations for young-growth mixed conifers of Northern California. Northern California Forest Yield Cooperative Res. Note NO.8. Dept. of For. and Res. Mgt., Univ. Calif. Berkeley.
- Bilir, N. (2009). Cone, seed and nut characters in *Pinus pinea*. International Convention Center Seed orchards and the link to long-term tree breeding in response to climate change, Jeju, Korea. 8-11/9/2009. IUFRO. Forestry Faculty, Suleyman Demirel University, Isparta, Turkey
- Blanco, E. Casado, M. Costa, R. Escribano, M. & Garcia, M. (1997). Los bosques ibéricos. Una interpretacion geobotanica. Ed. Planeta, Madrid.
- BNEDER., Bureau National d'Etudes pour le Développement Rural. (2009). Étude du directeur de développement agricole de Mostaganem, vol.1, 203p.

- Bolling, B.W. Oliver, C.Y. McKay, D.L. & Blumberg, J.B. (2011) Tree nut phytochemicals: composition, antioxidant capacity, bioactivity, impact factors: a systematic review of almonds, Brazils, cashews, hazelnuts, macadamias, pecans, pine nuts, pistachios and walnuts. *Nutr Res Rev* 24:244–275.
- Boncompagni, T. (1952). Alcune ricerche sulla biologia dei semi di *Pinus pinea* L. Tesi di Laurea. Ist Selvicoltura, Università di Firenze.
- Bonnor, G.M. (1968). Stem diameter estimates from crown width and tree height. *Commonwealth Forestry Review*, 47, 8–13. <https://www.jstor.org/stable/42603649>.
- Bontemps, J.J.D & Bouriaud, O. (2013). Predictive approaches to forest site productivity: Recent trends, challenges and future perspectives. *Forestry*, 87, p. 109-128.
- Boulaine, J. (1955). Notice explicative de la carte de reconnaissance des sols d'Algérie. Feuille de Mostaganem. N° 21. Édit. Gouvernement Général de l'Algérie, Alger (Algérie), 17 p.
- Bredenkamp, B. (1984). The CCT concept in spacing research – a review . In *Symposium on Site and Productivity of Fast Growing Plantations*. D.C. Grey A.P.G. Schönau and C.J. Schultz (eds). 30 April – 11 May 1984, Pretoria and Pietermaritzburg, South Africa, SAFRI , Pretoria , pp. 313 – 332.
- Bruce, D. (1923). Preliminary yield tables for second growth redwoods. *Univ. Calif. Agric. Exp. Sta. Bull.* 361 :423-467.
- Bryndum, H. (1980). Bøgehugstforsøget i Totterup Skov . *Det forstlige Forsøgsvæs.* Dan. 38, 176.
- Bull, H. (1931). The use of polymorphic curves in determining site quality in young red pine plantations . *J. Agric. Res.* 43, 1-29.
- Bullok, J.M. (2000). Gaps and seedling colonization. In Fenner, M. (Ed.) *Seeds: The ecology of seeds regeneration in plant communities*. Trowbridge: CAB International. pp. 375-395.
- Burger, J.A. (2004). Soil and its relationship to forest productivity and health . *Encycl. For. Sci.* 3, 1189-1195.
- Burkhart, H. Tomé, M. (2012). *Modeling Forest Trees and Stands*. Dordrecht, Springer. 457 pp.
- Burrows, W.H. (2002). Growth and carbon stock change in eucalypt woodlands in northeast Australia: ecological and greenhouse sink implications. *Global Change Biology*, 8, 769-784. DOI: 10.1046/j.1365-2486.2002.00515.x.
- Bernard, B. (1961). Biologie du parasite, moyens de lutte, etude d'une attaque de « *armillariella mellea* » (vahl) quel. Sur l'épicéa de sitka

- Cabanettes, A. & Rapp, M. (1981). Biomasse, minéralomasse et productivité d'un écosystème à Pins pignons (*Pinus pinea* L.) du littoral méditerranéen. 3. Croissance. Acta Oecologica. Oecologia Plantarum 16: 121-136.
- 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, vol. 60, no. 3, pp. 259-269.
- Calama, R. & Montero, G. (2005). 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. & Montero, G. (2007). Cone and seed production from stone pine (*Pinus pinea* L.) stands in Central Range (Spain). Eur. J. For. Res. 126(1):23-35.
- Calama, R. Gordo, F. Mutke, S. & Montero, G. (2008). An empirical ecological-type model for predicting stone pine (*Pinus pinea* L.) cone production in the Northern Plateau (Spain). For. Ecol. Manage. 255:660-673.
- Calama, R. Mutke, S. Tomé, J. Gordo, J. Montero, G. & Tomé, M. (2011). Modelling spatial and temporal variability in a zero-inflated variable: the case of stone pine (*Pinus pinea* L.) cone production. Ecol Model 222:606-618.
- Calama, R. Gordo, J. Conde, M. Madrigal, G. Mutke, S. Pardos, M. Garriga, E. Montero, G. & Fontes, L. (2015). Rendimiento de piñón en piña de *Pinus pinea* en Portugal: caracterización y comparación con otras regiones. Seminario UNAC bavanços no conhecimento na fileira do Pinheiro manso. Alcácer do Sal: UNAC.
- Cañadas, M.N. (2000). *Pinus pinea* L. en el Sistema Central (Valles del Tietary del Alberche): Desarrollo de un modelo de crecimiento y producción de pinya. Ph.D. diss. Universidad Politecnica de Madrid, Spain.
- Carrion, J.S. Fernandez, S. Jimenez-Moreno, G. & Fauquette, S. (2009). The historical origins of aridity and vegetation degradation in southeastern Spain. J. Arid Environ. 74(7):731–736. doi: 10.1016/j.jaridenv.2008.11.014.
- Castaño, J.R. Oliet, M.E. Abellanas, B. Butler, I. (2004). Puesta en valor de los recursos forestales mediterraneos: El injerto de pino pionero (*Pinus pinea* L.) Manuales de restauración forestal 9. Junta de Andalucía, Sevilla, Spain.
- Castellani, C. (1989). La produzione legnosae del frutoe la durata economico delle pinete coetanee di pino domestico (*Pinus pinea* L.) in un complesso assestato a prevalente funzione produttiva in Italia. Annali ISFAFA 12:161–221.
- Castellani, C. (1979). Studio sull'incremento diametrico stagionale delle più importanti specie forestali che popolano iboschi italiani. Annali Istituto Sperimentale Assestamento e Alpicoltura, Vol. 7. Trento.

- CFM., Conservation des forêts de la wilaya de Mostaganem. (2021). Rapport annuel sur l'état des forêts de la wilaya de Mostaganem.
- Chaabane, A. (1993). Etude de la végétation du littoral septentrional de la Tunisie : Typologie, Syntaxonomie et éléments d'aménagement. Thèse. Doctorat en Science. Université de Marseille III. 338 p.
- Ciancio, O. Cutini, A. Mercurio, R. Veracini, A. (1990). Un modèle sylvicole pour la conservation et l'amélioration de la pinède de Pin pignon d'Albères (Toscane, Italie). Forêt Médit XII (2):130-142.
- Ciancio, O. (1968). Tavola cormometrica del pino domestico di Piazza Armerina cresciuto in fustaia coetanea. L'italia Forestale e Montana 23:136-143.
- Cieszewski, C.J. & Bailey, R.L. (2000). Generalized algebraic difference approach: Theory based derivation of dynamic site equations with polymorphism and variable asymptotes. For. Sci. 46:116-126.
- Cieszewski, C.J. (2002). Comparing fixed- and variable-base-age polymorphic site equations having single versus multiple asymptotes. For. Sci. 48(1):7-23.
- Cieszewski, C.J. (2004). GADA derivation of dynamic site equations with polymorphism and variable asymptotes from Richards, Weibull, and other exponential functions. PMRC Tech. Rep.5.
- Cieszewski, C.J. & Bella, I.E. (1989). Polymorphic height growth and site index curves for lodgepole pine in Alberta. Can. J. For. Res. 19:1151-1160.
- Clark, J.S. Beckage, B. Camill, P. Cleveland, B. (1999). Interpreting recruitment limitation in forests. American Journal of Botany 86: 1-16.
- Clutter, J.L. Fortson, J.C. Pienaar, L.V. Brister, G.H. & Bailey, R.L. (1983). Timber Management: A Quantitative Approach. Wiley, New York.
- Coelho, I.S. (1997). El pino pinõnero en Portugal: economia y sistemas de explotacion. Revista Montes 50:13-20.
- Colle, T.S. & Schumacher, F.X. (1953). Relation of soil properties to soil site index of loblolly and shortleaf pines in the Piedmont Region of the Carolinas, Georgia, and Alabama. J. Forest. 51 (10), 739-744.
- Court-Picon, M. Gadbin-Henry, C. Guibal, F. & Roux, M. (2004). Dendrometry and morphometry of *Pinus pinea* L. in Lower Provence (France): Adaptability and variability of provenances. For. Ecol. Manag. 194:319-333.
- Crow, T.R. Dey, D.C., & Riemenschneider, D. (2006). Forest productivity: Producing goods and services for people. Gen. Tech. Rep. NC-246 (St. Paul, MN: USDA For. Serv., Nor. Cent. Res. Stat), 34 p.

- Cuesta, C. Ordas, R.J. Fernandez, B. & Rodriguez, A. (2008). Clonal micropropagation of six selected half-sibling families of *Pinus pinea* and somaclonal variation analysis. *Plant Cell Tiss. Organ. Cult.* 95:125-130.
- Cunningham A.B. (2001). *Applied ethnobotany, people, wild plant use and conservation*, WWF. Earthscan Publications Ltd, London.
- Daget, P & Davide, P. (1982). Essai de comparaison de diverses approches climatiques de la méditerranéité. *Ecologia Mediterranea T.VIII-(1-2)* :33-48p.
- Dagnelie, P. (1957). Recherches sur la productivité des hêtraies d'Ardenne en relation avec les types phytosociologiques et les facteurs écologiques *Bull. Inst. Agron. Stat. Rech. Gembloux*, (24), 249-284; (25), 44-94.
- Davis, L.S. Johnson, K.N. Bettinger, P. & Howard, T.E. (2001). *Forest Management: To Sustain Ecological, Economic, and Social Values*. 4th Edition (Long Grove, Illinois: Waveland Press, Inc), 804 pp.
- Dawkins, H.C. (1963). Crown diameters: their relation to bole diameter in tropical forest trees. *Commonwealth Forestry Review*, 42, 318–333. <https://www.jstor.org/stable/42603453>.
- Day, M.W. Bey, C.F., Rudolph, V.J. (1960). Site index for planted Red Pine by the 5-year growth intercept method. *J. Forestry* 58 (3), 198-202.
- De Martonne, E. (1926). Une nouvelle fonction climatologique : l'indice d'aridité. *La météo.* 926. 449-459 p.
- DeBell, D.S. & Harrington, C.A. (2002). Density and rectangularity of planting influence 20 year growth and development of red alder. *Can. J. For. Res.* 32, 1244-1253.
- Debrach, J. (1953). Notes sur les climats du Maroc occidental. Extrait du (*Maroc- Médial*) N° 342, 32. *Inst. Sci. Chérif. Casablanca (Maroc)* 3-14 p.
- Decourt, N. (1964). Production tables, their limitations and usefulness. *Rev.for.Fr.*16, p. 640-657.
- Decourt, N. (1973). Production primaire, production utile: méthodes d'évaluation, indices de productivité. In «*Ecologie forestière. Station et production ligneuse*». *Ann. Sci. Forest.*, 30 (3); 219-238.
- Djaziri, A. (1971). Étude stationnelle du Pin pignon en Italie. I.N.R.F., Tunisie, Variété scientifique. n. 9, pp. 94.
- Djebaili, S. (1978). Recherches phytosociologiques et écologiques sur la végétation des hautes plaines steppiques et de l'Atlas Saharien algérien. Thèse Doct. Univ. Sc. Tech. Languedoc. Montpellier. 229 p.

- DREW., Direction des Ressources en Eau de la wilaya. (2021). Rapport sur l'état des ressources en eau de la wilaya de Mostaganem.
- DSA., Direction des Services Agricole de la wilaya de Mostaganem. (2022). Fascicule des statistiques agricoles de la wilaya de Mostaganem.
- Duplat, P. (1986). Modèle de croissance en hauteur dominante pour le hêtre (*Fagus sylvatica* L.), le sapin pectiné (*Abies alba* Miller), le pin sylvestre (*Pinus sylvestris* L.) dans le massif de l'Aigoual. O.N.F., Section Technique, Doc. 86.1, 34 p + annexes.
- Earle, C.J. (2009). *Pinus pinea*. The gymnosperm database. Accessed 10 January 2022. www.conifers.org/pi/pin/pinea.htm
- Edwards, P.N. & Christie, J.M. (1981). Yield models for forest management. Forestry Commission Booklet 48, HMSO, London.
- Eichhorn, F. (1902). Ertragstabeln für die Weistanne. Verlag von Julius Springer, Berlin.
- Eichhorn, F. (1904). Beziehungen zwischen Bestandshöhe und Bestandsmasse . Allg. Forst. Jagdztg. 80, 45-49.
- Emberger, L. (1955). Une classification biogéographique des climats. Rev. Trav. Labo. Bot. Zool. Fac. Science. Montpellier. 1-43p.
- Evaristo, I. Tenreiro, R. & Costa, R. (2008). Caracterização de parâmetros biométricos e de ácidos gordos em pinhões de populações portuguesas de *Pinus pinea*. *Silva Lusit* 16(1):1-19
- Evaristo, I. Batista, D. Correia, I. Correia, P. & Costa, R. (2013). Chemical profiling of Portuguese *Pinus pinea* L. nuts and comparative analysis with *P. koraiensis* Sieb. & Zucc. Commercial kernels. *Options Méditerran* 105:99-104.
- Evert, F. (1971). Spacing Studies - A Review. Forest Management Institute Information Report, FMR-X- 37. Canadian Forest Service Ottawa, Ontario.
- Fady, B. Fineschi, S. & Vendramin, G.G. (2004). EUFORGEN technical guidelines for genetic conservation and use of Italian Stone pine (*Pinus pinea* L.). International Plant Genetic Resources Institute, Roma: 6.
- Fallour, D. Fady, B. & Lefevre, F. (1997). Study of isozyme variation in *Pinus pinea* L. Evidence for low polymorphism. *Silvae Geneticae* 46(4):201–207.
- FAO., Food and Agriculture Organization of the United Nations. (1998). Seeds, fruits and cones. In: Non-wood forest products from conifers. Series Non-Wood Forest Products 12. www.fao.org/docrep/X0453e/X0453e06.htm.
- FAO., Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2016). Environmental conservation and forestry (MYANMAR: National Action Plan for Agriculture (NAPA) Working Paper 5, Yangon). Available at: <http://www.fao.org/3/a-bl825e>.

- Farjon, A. (2005). Pines. Drawings and descriptions of the genus *Pinus* (2nd ed.) Brill, Leiden, Netherlands.
- Feinbrun, N. (1959). Spontaneous Pineta in the Lebanon. *Bul. Res. Counc. Israel* 7D: 132-153.
- Felton, A. Löfroth, T. Angelstam, P. Gustafsson, L. Hjältén, J. & Felton, A.M. (2020). Keeping pace with forestry: Multi-scale conservation in a changing production forest matrix. *Ambio* 49, 1050–1064. doi: 10.1007/s13280-019-01248-0.
- Ferrari, L. (1950). Alcune ricerche sulla biologia dei semi di *Pinus pinea* L. *Pinus halepensis* Mill. Tesi di Laurea. Ist. Selvicoltura. Università di Firenze.
- Ferree, M.J. Shearer, T.D. & Stone, E.J. (1958). A method of evaluating site quality in young red pine plantations. *J. Forest.* 56, 328-332.
- Finlayson, C., Giles Pacheco, F. & Rodriguez-Vidal, J. (2006). Late survival of Neanderthals at the southernmost extreme of Europe. *Nature* 443:850-853.
- Fonweban, J.N. & Houlier, F. (1995). Modèle de croissance en hauteur à partir de placettes temporaires pour *Eucalyptus saligna* au Cameroun. *Ann. sci. Forest.* 52, 513-528.
- Foster, S.A. (1986). On the adaptative value of large seeds for tropical moist forest trees: A review and synthesis. *Bot. Rev.* 52(3):260-299.
- Francini, E. (1958). Ecologia comparata de *Pinus halepensis* Mill., *Pinus pinaster* Sol. e *Pinus pinea* L. sulla base del comportamento del gametofito femminile. *Annali della Accademia Italiana di Scienze Forestali* 7:171.
- Franclet, A. (1970). Stimulation de l'ouverture des cônes de pins. Institut national de Recherche en Génie rural, Eaux et Forêts, Tunisie, note technique n° 13, 28 p.
- Franco-Mu'gica, F. Garcia-Antõn, M. Maldonado-Ruiz, J. Morla-Juaristi, C. & Sainz- Ollero, H. (2005). Ancient pine forest on inland dunes in the Spanish northern Meseta. *Quatern. Res.* 63:1-14.
- Fuentes, V. (2009). Analisis del mercado internacional de pinones de *Pinus pinea* L. M.Sc. thesis. Univ. Chile, Santiago de Chile.
- Gandullo, J.M. & Sanchez-Palomares, O. (1994). Estaciones ecologicas de los pinares espanioles. MAPA, Madrid.
- Ganghofer, A. (1881). *Das Forstliche Versuchswesen*, Vol.1. Schmid, Augsburg, pp. 353-480.
- Garcia-Amorena, I. Gomez Manzanque, F. Rubiales, J.M. & Granja, H.M. (2007). The Late Quaternary coastal forests of western Iberia: A study of their macroremains. *Palaeo.* 254:448-461.

- Gausсен, H. & Leroy, J.F. (1982). Précis de botanique. Tome 2 : Végétaux Supérieurs. Ed. Masson, Paris.
- Gehrhardt, E. (1909). Ueber Bestandes-Wachstumsgesetze und ihre Anwendung zur Aufstellung von Ertragstafeln. Allg. Forst. Jagdztg. 85, 117-128.
- Gehrhardt, E. (1921). Eine neue Kiefern-Ertragstafel. Allg. Forst. Jagdztg. 97, 145-156.
- Gering, L.R. & May, D.M. (1995). The relationship of diameter at breast height and crown diameter for four species groups in Hardin County, Tennessee. South J. Appl. For., 19, 177–181. <https://www.fs.usda.gov/treesearch/pubs/3156>.
- Gil, L. (1999). La transformación histórica del paisaje: La permanencia y la extinción local del pino pinónero. p. 151-185. In: F. Marín, J. Domingo and A. Calzado (eds.), 1 Jornadas de historia, socioeconomía y política forestal: Los montes y su historia-una perspectiva política, económica y social. Universidad de Huelva, Spain.
- Giordano, G. (1990). Classificazione delle specie legnose per destinazione d'impiego. Sviluppo del Legno S.R.L. - Ministero dell'Agricoltura e delle Foreste, Direzione Generale per l'Economia Montana e per le Foreste.
- Goelz, J.C.G. (1996). Open-grown crown radius of eleven bottomland hardwood species: prediction and use in assessing stochng. South J. Appl. For., 20, 156-161.
- Gonçalves, A.C. & Pommerening, A. (2012). Spatial dynamics of cone production in Mediterranean climates: a case study of *Pinus pinea* L. in Portugal. For Ecol Manag 266:83-93.
- Gonzales-Vasquez, E. (1947). Selvicultura. Libro primero: Fundamentos naturales y especies forestales. Los bosques ibéricos. Segunda edic. Editorial Dossat, S. A., Madrid.
- Gordo, J., Mutke, S. & Prada, M.A. (1999). El pino pinónero (*Pinus pinea* L.). In: R. Alía, R. Galera and S. Martín (coord.), Mejora genética y masas productoras de semilla de los pinares españoles. Monografías INIA Forestal no. 1, MAPA, Madrid. p. 223-239.
- Gordo, J. (2004). Selección de grandes productores de fruto de *Pinus pinea* L. en la Meseta Norte. Ph. D. diss. Universidad Politécnica de Madrid, Spain. <http://oa.upm.es/179/>.
- Gordo, J. Mutke, S. & Gil, L. (2007). Ausencia de diferenciación ecotípica entre rodales selectos de pino pinónero en la cuenca del Duero. Inv. Agrar.: Sist. Rec. Forest. 16 (3):253-261.
- Gordo, J. Calama, R. Pardos, M. Bravo, F. & Montero, G. (2012). La regeneración natural de los pinares en los arenales de la Meseta Castellana. Valladolid, Spain: Instituto Universitario de Investigación en Gestión Forestal Sostenible, Universidad de Valladolid, INIA.

- Gram, J.P. (1879). Om Konstruktion af Normal-Tilvæxtoversigter, med særligt Hensyn til lagttagelserne fra Odsherred. Tidsskr. Skovbrug 3, 207-270.
- Greco, J. (1966). L'érosion, la défense et la restauration des sols, le reboisement en Algérie. Pub. Univ. Agr. Révolution Agraire. Algérie.
- Gyldenfeldt, W. (1883). En Tilvæxtoversigt for Bøg paa 2det Kjøbenhavn Distrikt. Tidsskr Skovbrug 6, 1-46.
- Hägglund, B. (1981). Evaluation of forest site productivity. For. Abstr. 42, 515-527.
- Hägglund, B. & Lundmark, J.E. (1977). Site index estimation by means of site properties. Scots pine and Norway spruce in Sweden. Stud. For. Suec. 138.
- Halimi, A. (1980). L'Atlas Blidéen : Climat et étages végétaux. O.P.U. Alger. 484 p.
- Halle, F. & Oldeman, R.A.A. (1970). Essai sur l'architecture et la dynamique de croissance des arbres tropicaux. Masson & Co., Paris.
- Hamilton, G.J. (1975). Forest mensuration handbook. Forestry Commission Booklet No. 39. London: HMSO.
- Hanna, C. (2003). Bioecologie de *Ernobius anatolicus* Johns sur *Cedrus libani* A. Rich et *Pinus pinea* L." Diploma Thesis submitted to the Faculty of Agriculture in the Lebanese University.
- Harper, J.L. (1977). Population biology of plants. London, Academic Press.
- Harrington, C.A. & Reukema, D.L. (1983). Initial shock and long-term stand development following thinning in a Douglas-fir plantation. For. Sci. 29, 33-46.
- Hartig, R. (1892). Ueber den Entwicklungsgang der Fichte im geschlossenen Bestände nach Höhe, Form und Inhalt . Forstl.-nat. Z. 1, 169-185.
- Hartig, G.L. (1795). Anweisung zur Taxation und Beschreibung der Forste, oder zur Bestimmung des Holzertrages der Wälder. Heyer, Gießen.
- Hartig, T. (1847). Vergleichende Untersuchungen über den Ertrag der Rothbuche im Hoch- und Planz- Walde, im Mittel- und Niederwald-Betriebe nebst Anleitung zu vergleichenden Ertragsforschungen . Albert Förstner, Berlin.
- Hengst, E. (1958). The yield management of pine in eastern Thuringia. Arch. Forstwes., 7, 653-702.
- Henry, F. Talon, B. & Dutoit, T. (2010). The age and history of the French Mediterranean steppe revisited by soil wood charcoal analysis. Holocene 20(1):25-34.
- Heyer, C. (1841). Die Waldertrags-Regelung. Verlag von B.C. Ferber, Giesen.

- Holten-Andersen, P. (1989). Danish yield tables in the past century. *Det forstlige Forsøgsvæs. Dan.* 42, 71-145.
- Hossfeld, J.W. (1822). *Mathematik für Forstmänner, Ökonomen und Cameralisten*. Gotha, Germany: 4 Bd (in German).
- Huang, S. Titus, S.J. & Wiens, D.P. (1992). Comparison of nonlinear height-diameter functions for major Alberta tree species. *Can. J. For. Res.*, 22(9), 1297–1304. DOI: 10.1139/x92-172.
- Hummel, F.C. (1955). The volume-basal area line. *Forest Record No. 24*. London: Forestry Commission.
- IFN., Inventaire forestier national. (2017). *Caractéristiques générales de Pin pignon*.
- Jarosz, K. & Klapiec, B. (2002). Modelowanie wzrostu wysokości przy pomocy funkcji Gompertza (Height growth modelling using the Gompertz function). *Sylvan* 4:35-42.
- Jenkins, M. & Schaap, B. (2018). *Forest Ecosystem Services. Background Analytical Study 1. Background study prepared for the thirteenth session of the United Nations Forum on Forests*, 41p.
- Johannsen, V.K. (1999). A growth model for oak in Denmark Ph.D. Thesis, Royal Veterinary and Agricultural University, Copenhagen.
- Johnson, M. Vander Wall, S. & Borchert, M. (2003). A comparative analysis of seed and cone characteristics and seed-dispersal strategies of three pines in the subsection Sabinianae. *Plant Ecol.* 168:69-84.
- Johnson, N.L. (1949). Bivariate distributions based on simple translation systems. *Biometrika*, 36(3-4), 297-304. <https://www.jstor.org/stable/i315416>.
- Joly, R. (1975). *Les insectes ennemis des pins. Faune de France. Vol 40. Le chevalier*. Paris. 601pp.
- Jonson, T. (1914). Om bonitering av skogsmark. *Skogsvårdsföreningens Tidskr.* 12, 369-392.
- Jurado, N. (2009). Estudio piloto para la recuperación de parcelas experimentales de *Pinus pinea* en la Comunidad Valenciana. M. Sc. thesis. Universidad Politecnica de Valencia, Spain.
- Kadik, B. (1983). Contribution à l'étude du Pin d'Alep en Algérie : Ecologie, dendrométrie, morphologie Thèse Doct. Etat. Aix-Marseille III. 313p.
- Keeling, H.C. & Phillips, O.L. (2007). The global relationship between forest productivity and biomass. *Glob. Ecol. Biogeog.* 16, 618-631. doi: 10.1111/ j.1466-8238.2007.00314.x.

- Kerr, G. (2003). Effects of spacing on the early growth of planted *Fraxinus excelsior* L. Can. J. For. Res. 33, 1196–1207.
- Khalidi, 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.
- Khouja, M. (2000). Bilan au stade juvénile des essaies de provenances de Pin pignon installés en Tunisie. In 1^{er} Simposio del pino pinonero (*Pinus pinea* L.) 22, 23, 24 de febrero 2000, Valladolid, Spain. pp:111-120.
- Kimberley, M.O. & Ledgard, N.J. (1998). Site index curves for *Pinus nigra* grown in the South Island high country, New Zealand. New Zealand Journal of Forestry Science, 28(3), 389-399.
- Klaus, S. (1989). Mediteranean pines and their history. Plant Syst. Evol. 162:133-163.
- Kouyate, A.M. Nacoulma, B.M.I. Lykke, A.M. & Thiombiano, A. (2016). Estimation de la production fruitière des espèces ligneuses alimentaires en Afrique sub-saharienne. Annales des Sciences Agronomiques 20 - spécial Projet Undesert-UE : 69-78.
- Krajicek, J.E. Brinkman, K.A. & Gingrich, S.F. (1961). Crown competition-a measure of density. For. Sci., 7, 35-42. <https://www.cabi.org/ISC/abstract/19610604908>.
- Kramer, H. (1959). Die Oberhohe als Bestandesmerkmal Allg. Forst. u. Jagdz. 30 (10), 241-255.
- Kramer, H. (1988). Waldwachstumslehre. Ökologische und anthropogene Einflüsse auf das Wachstum des Waldes, seine Massen- und Wertleistung und die Bestandessicherheit. Verlag Paul Parey, Hamburg.
- Lamien, N. Tigabu, M. Guinko, S. & Oden-Per, C. (2007). Variations in dendrometric and fruiting characters of *Vitellaria paradoxa* populations and multivariate models for estimation of fruit yield. Agroforestry Systems 69: 1-11.
- Langsæter, A. (1941). Om tynning i enaldret granog furuskog. Medd. Nor. Skogforsøksves. 8, 131-216.
- Lanner, R.M. (1976). Patterns of shoot development in *Pinus* and their relationship to growth potencial, In : M.G.R. Cannel and F.T. Last (eds.), Tree physiology and yield improvement. Academic Press, New York. pp. 223-243.
- Lanner, R.M. (1985). On the insensitivity of height growth to spacing. For. Ecol. Manage. 13, 143-148.
- Lanner, R.M. (1989). An observation on apical dominance and the umbrella-shaped crown of Italian stone pine (*Pinus pinea*, Pinaceae). Econ. Botan. 43:128-130.

- Le Houerou, H.N. (1995). Bioclimatologie et biogéographie des steppes arides de l'Afrique, diversité biologique, développement durable et désertification. Options méditerranéennes, série B: recherche et études, 1-396.
- Leary, R.A. (1985). Interaction Theory in Forest Ecology and Management. Martinus Nijhoff/Dr W. Junk Publishers, Dordrecht.
- Lemoine, B. (1969). Le pin maritime dans les landes de Gascogne. Etude des relations d'allométrie concernant le volume des peuplements, en liaison avec certaines caractéristiques de la station. Ann. Sci. Forest. 26 (4), 445-473.
- Leuschner, W.A. (1984). Introduction to Forest Resource Management (Malabar, Florida: Krieger Publishing Company), 298 p.
- Loewe, V. Toral, M. Delard, C. Lopez, C. & Urquieta, E. (1997). Monografía de Pino pinõnero (*Pinus pinea* L) CONAF-INFOR-FIA, Santiago de Chile.
- Loewe, V. (2016). Characterization of variability, growth and production of Stone pine (*Pinus pinea* L.) in Chile according to climate and some silvicultural practices. Doctoral Thesis, University of Córdoba, Spain. 332 p.
- Loewe, V. Balzarín, M. Delard, C. & Álvarez, A. (2019). Variability of stone pine (*Pinus pinea* L.) fruit traits impacting pine nut yield. Annals of Forest Science 76:37 <https://doi.org/10.1007/s13595-019-0816-0>.
- Loisel, R. (1976). Place et rôle des espèces du genre *Pinus* dans la végétation du sud-est méditerranéen français. Ecologia Mediterranea 10: 131-152.
- Lopez-Cadenas de Liano, F. & Blanco-Criado, M. (1976). Forest hydrology. Universidad Politecnica de Madrid (Spain).
- Lundqvist, B. (1957). On height growth in cultivated stands of pine and spruce in Northern Sweden. Medd Fran Statens Skogforsk 47: 1-64.
- Mac-Farlane, D.W. Green, E.J. & Burkhart, H.E. (2000). Population density influences assessment and application of site index. Can. J. For. Res. 30, 1472-1475.
- Magini, E. (1955). Sulle condizioni di germinazione del pine d'Aleppo e del pino domestico. L'Italia Forestale e Montana. 10: 106-124.
- Martinez, F. Montero, G. Ruiz-Peinado, R. Cañellas, I. & Candela, J.A. (2004). Geobotanica e historia de los pinares. In G. Montero, J.A. Candela, and A. Fernandez (eds.), El Pinopiñonero (*Pinus pinea* L.) en Andalucía: Ecología, distribución y silvicultura. Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía, Sevilla, Spain.
- Mathiasen, R.L. Olsen, W.K. Olsen, W.K. & Edminster, C.B. (2006). Site Index Curves for White Fir in the Southwestern United States Developed Using a Guide Curve Method. West. J. Appl. For. 2006, 21, 87-93.

- Mayer, A.M. & Poljakoff-Mayber, A. (1989). The germination of seeds, 4th. (Ed.). Oxford, U.K., Pergamon Press.
- McDill, M.E. & Amateis, R.L. (1992). Measuring forest site quality using the parameters of a dimensionally compatible height growth function. *Forest Science*, 38, 409-429.
- Menendez-Amor, J. (1951). Una piña fosil nueva para el plioceno de Malaga. Bol. Real Soc. Esp. Hist. Nat. (Secc. Geol.) 49:193-195.
- Mercurio, R. (1989). Notes sur la sylviculture du Pin pignon (*Pinus pinea* L.) en Italie. Reunion sobre Selvicoltura, Mejora y Produccion de *Pinus pinea*. Session on "Sylvicultural practices on *Pinus pinea* stands. INIA-CEE. Madrid.
- Minckler, L.S. & Gingrich, S.F. (1970). Relation of crown width to tree diameter in some upland hardwood stands of southern Illinois. USDA Forest Serv. Res. Note NC99, St. Paul. <https://www.fs.usda.gov/treearch/pubs/11156>.
- Minor, C.O. (1951). Stern-crown diameter relationships in southern pine. J. For., 49, 490-493.
- Mirov, N.T. (1967). The genus *Pinus*. Ronald Press, New York.
- Mitchell, K.J. (1969). Simulation of the growth of even-aged stands of white spruce. Yale Univ. Sch. For. Bull. 75, 1-48.
- Møller, C.M. (1933). Boniteringstabeller og bonitetsvise Tilvækstoversigter for Bøg, Eg og Rødgran i Danmark. Dan. Skovforen. Tidsskr. 18, 457-513, 537-623.
- Møller, C.M. (1944). Untersuchungen über Laubmenge, Stoffverlust und Stoffproduktion des Waldes. Det forstlige Forsøgsvæs. Dan. 17, 1-287.
- Møller, C.M. (1951). Træmålingsog tilvækstlære. Denkg. Veterinærog Landbohøjskole, København.
- Møller, C.M. (1954). The influence of thinning on volume increment. I. Results of investigations. In *Thinning Problems and Practices in Denmark*. S.O. Heiberg, (ed). State University of New York, College of Forestry at Syracuse, World Forestry Series, Syracuse, New York Publication One, pp. 5-32.
- Monserud, R.A. (1984). Problems with site index: an opinionated review. In *Forest Land Classification: Experience, Problems, Perspectives*. J.A. Bockheim (ed). Proceeding University of Wisconsin, Madison, pp. 16-180.
- Monserud, R.A. (1987). Variations on the Theme of Site Index. USDA Forest Service General Technical Report NC 120. North Central Forest Experiment Station, St Paul, MN, pp. 419-427.
- Monserud, R.A. Moody, U. Breuer, D.W. (1990). A soil-site study for inland Douglas-fir. *Can. J. For. Res.* 1990, 20,686-695.

- Montero, G. Candela, J.A. & Fernandez, A. (2004). El Pino piñonero (*Pinus pinea* L.) en Andalucía: Ecología, distribución y silvicultura. Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía, Sevilla, Spain.
- Montero, G. Calama, R. & Ruiz-Peinado, R. (2008). Silvicultura de *Pinus pinea* L. p. 431-470. INIA-Fundación Conde del Valle de Salazar, Madrid.
- Morales, L. (2009). Modelos para la predicción del contenido y calidad de pino en pinas de *Pinus pinea* L. en los Valles del Tietar y del Alberche. M. Sc. thesis. Universidad Politécnica de Madrid, Spain.
- Mupangwa, W.A. & Tagwira, A. (2005). Groundnut yield response to single superphosphate, calcitic lim and gypsum on acid granitic sandy soil. Nutrient cycling in agroecosystems.73, 161-169.
- 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.
- Mutke, S. Diaz-Balteiro, L. & Gordo, J. (2000). Análisis comparativo de la rentabilidad comercial privada de plantaciones de *Pinus pinea* L. en tierras agrarias de la provincia de Valladolid. Inv. Agr.: Sist. Rec. For. 9(2):269-303.
- Mutke, S. Gordo, J. & Gil, L. (2003). Shoot growth and phenology modelling of grafted stone pine (*Pinus pinea* L.) in inner Spain. Ann. For. Sc. 60:527-537.
- Mutke, S. Sievanen, R. Nikinmaa, E. Perttunen, J. & Gil, L. (2005). Crown architecture of grafted stone pine (*Pinus pinea* L.): Shoot growth and bud differentiation. Trees 19:15-25.
- Mutke, S. Gordo, J. & Gil, L. (2006). Pérdida de producción de piña en los pinares de piñonero como consecuencia del cambio climático. Foresta 32:34-38.
- Mutke, S. Gordo, J. Chambel, M.R. Prada, M.A. Álvarez, D. Iglesias, S. & Gil, L. (2010). Phenotypic plasticity is stronger than adaptive differentiation among Mediterranean stone pine provenances. Forest Systems 19(3):354-366.
- Mutke, S. Calama, R. Gonzalez-Martinez, S.C. & Montero, G. (2012). Mediterranean Stone Pine: Botany and Horticulture. In Horticultural Reviews; Janick, J., Ed.; Wiley-Blackwell: Hoboken, NJ, USA ; Volume 39, p.153-201.
- Mutke, S. Martínez, J. Gordo, J. Nicolas, J.L. Herrero, N. Pastor, A. & Calama, R. (2014). Severe seed yield loss in Mediterranean Stone pine cones. 5th International Conference on Mediterranean Pines (Medpine5) September 22-26. Solsona, Spain.
- Nanos, N. Calama, R. Cañadas, N. Garcia, C. & Montero, G. (2003). Spatial stochastic modelling for cone production from stone pine (*Pinus pinea* L.) stands in Spanish Northern Plateau. p. 131-141.

- Notario, A. Sepulveda, L.F. Novillo, C. & Mayans, L. (1999). Definició de unitats de gestió ambiental en zones de especial protecció para las aves. *Rev. Montes* 57:56-60.
- Obeso, J.R. (2002). The cost of reproduction in plants. *New Phytol.* 155:321-348.
- Odum, E. P. (1959). *Fundamentals of Ecology* (Philadelphia, PA: W.B. Saunders).
- Oettelt, C.C. (1764). Practischer Beweis, dass die Mathesis bey dem Forstwesen unentbehrliche Dienste thue zum allgemeinen Besten. Joh. Andreas Schill, Arnstadt.
- Oliveira, A.C. (1995). Present situation and perspectives of *Pinus pinea* in Portugal. p. 39-46. In: First Stonepine Workshop. FAO/INIA, Madrid.
- Oppermann, A. (1887). Taksations- og Tilvækstlære. Chr. J. Taubers Bog- and Steentrykkeri, København.
- Otoul, C. (1978). Contribution à l'étude de productivité du chêne rouvre en Ardenne (région de Wellin). *Ann. de Gembloux*, 84 (4), pp183-224.
- Ovando, P. Campos, P. Calama, R. & Montero, G. (2010). Landowner net benefit from stone pine (*Pinus pinea* L.) afforestation of dry-land cereal fields in Valladolid, Spain. *J. Forest Econ.* 16(2):83-100. doi: 10.1016/j.jfe.2009.07.001.
- Ozenda, P. (1986). *La cartographie écologique et ses applications*. Edition Masson. 158 p.
- Ozenda, P. (1991). *Les organismes végétaux, 2. Végétaux Supérieurs*, Ed. Masson, Paris.
- Page, G. (1970). Quantitative site assessment some practical applications in British Forestry. *Forestry* 43 (1), 45-56.
- Pageaud, D. (1991). Reconstitution naturelle de peuplements résineux après incendie (*Pinus pinea* L. et *Pinus halepensis* Mill.) INRA, Avignon.
- Parde, J. (1964). La lecture des bâtonnets extraits des arbres par sondages à la tarière. *Rev. Fore. Fr.* 16,43-47.
- Parde, J. (1967). Réflexion sur la productivité des forêts françaises. Centre national de Recherches forestières, Nancy, 477-485.
- Parde, J. & Bouchon, J. (1988). *Dendrométrie*. 2ème édition. Nancy, Ecole National du génie rural des eaux et forêts, 328 p.
- Parde, J. (1976). Les variations des tables de production. *Reiheft zu den Zeitschriften des Schweizforstvereins* nr. 57, 87-94.
- Paterson, S.S. (1956). The forest area of the world and its potential productivity. *Medd. Göteborgs Univ. Geografiska Inst.* 51.

- Paterson, S.S. (1962). Introduction to phytochorology of Norden. Medd. Statens. Skogforskningsinst. 50 (5), 1-145.
- Paulsen, J.C. (1795). Kurze praktische Anweisung zum Forstwesen oder Grundsätze ueber die vorteilhafteste Einrichtung der Forsthaushaltung und ueber Ausmittlung des Werths vom Forstgrunde besonders auf die Grafschaft Lippe angewendet. Kammerrat Georg Ferdinand Fuehrer, Detmold.
- Pauwels, D. & Rondeux, J. (2002). Tarifs de cubage pour les petits bois de mélèze (*Larix* sp) en Ardenne belge. Les cahiers forestiers de Gembloux n° 23, 11 p.
- Peruzzi, A. Cherubini, P. Gorreri, L. & Cavalli, S. (1998). Le pinete e la produzione dei pinoli dal passato ai giorni nostri, nel territorio del parco di Migliarino, S. Rossore, Massaciuccoli. S.l.: Felici Editore.
- Peschel, W. (1938). The mathematical methods for deriving the growth laws of trees and stands and the results of their application. (Die mathematischen Methoden zur Herleitung der Wachstumsgesetze von Baum und Bestand und die Ergebnisse ihrer Anwendung). – Tharandter Forstliches Jarbuch, 89, 169-274.
- Peters, C.M. (1996). The ecology and management of non-timber forest resources. World Bank, Tech. Pap. 322, Washington, USA.
- Peterson, E.B. Peterson, N.M. Weetman, G.F. & Martin, P.J. (1997). Ecology and Management of Sitka Spruce. UBC Press, Vancouver.
- Philip, M.S. (1994). Measuring Trees and Forests. 2nd edn. CAB International Wallingford, 310 pp.
- Piqué, M. (2003). Site index and yield models for *Pinus pinea* L. in north-east Spain: silvicultural guidelines for timber and fruit production, Ph.D. thesis, Escola Técnica Superior d'Enginyeria Agraria, UdL, Lleida, Spain.
- 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, pp. 129.
- Powers, R.F. & Oliver, W.W. (1978). Site classification of ponderosa pine stands under stocking control in California. USDA Forest ServoRes. Pap. PSW-128. 9p.
- Prada, M.A. Gordo, J. De Miguel, J. Mutke, S. Catalan, G. Iglesias, S. & Gil, L. (1997). Las regiones de procedencia de *Pinus pinea* L. en España. Organismo Autónomo de Parques Naturales, MAPA, Madrid.
- Pressler, M. (1870). Forstliche Ertrags- u. Bonitirungs-Tafeln nach Cubicmeter pro Hectar. Baumgärtner'sche Buchhandlung, Leipzig.
- Pretzsch, H. (2001). Modellierung des Waldwachstums. Parey, Berlin.

- Pretzsch, H. (2002). *Grundlagen der Waldwachstumsforschung*. Parey, Berlin.
- Pretzsch, H. Grote, R. Reineking, B. Rötzer, T. & Seifert, S. (2008). Models for forest ecosystem management: A European perspective. *Ann. Bot.* 2008, 101, 1065-1087.
- Ramil, P. & Aira, M.J. (1994). Datos sobre la presencia de *Pinus L.* en el N.O. de la Península Iberica durante el Holoceno a través del analisis polinico. *Revista de Biologia* 15:3-13.
- Rayner, M.E. & Turner, B.J. (1990). Growth and yield modelling of Australian eucalypt forests II. Future trends. *Aust. For.* 53, 238-247.
- Reventlow, C.D.F. (1816). *Formeentlige Resultater af endeel fortsatte under angaaende Indflydelsen af Træernes gjensidige Afstand paa deres mere eller mindre fordeelagtige vegetation. Det Kongelige Danske Videnskabernes Selskabs Skrifter for Aar 1809 og 1812, 3. Række, 6. Bind, II. Hæfte, pp. 1-24. Kiöbenhavn. Reprinted 1816 by Hartvig Friderich Popp.*
- Reventlow, C.D.F. (1879). *Forslag til en forbedret Skovdrift, grundet paa Undersøgelser over Træernes Vegetation i Danmarks og Slesvigs Skove. P. Hauberg and Co Kjøbenhavn.*
- Richards, F.J. (1959). A flexible growth model for empirical use. *J. Exp. Bot.* 10:290-300.
- Richardson, D.M. & Higgins, S.I. (1998). Pines as invaders in the southern hemisphere. p. 450-473. In: D.M. Richardson (ed.), *Ecology and biogeography of Pinus*. Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- Rikli, M. 1943. *Das Pflanzenkleid der Mittelmeerländer, Vol. 1. Huber, Bern, Switzerland.*
- Roberts, E.G. & Ross R.D. (1965). Crown area of freegrowing loblolly pine and its apparent independence of age and site. *J. For.*, 63, 462-463.
- Romero, F. (1886). *El pino pinonero en la provincia de Valladolid. Imprenta y Libreria Nacional y Extranjera de los Hijos de Rodriguez, Libreros de la Universidad y del Instituto, Valladolid, Spain.*
- Rondeux, J. (1993). *La mesure des arbres et des peuplements forestiers. Gembloux, Belgique, les presses agronomiques, 521p.*
- Rovira, N. & Chaval, L. (2008). A foundation offering at the Roman port of Lattara (Lattes, France): The plant remains. *Veget. Hist. Archaeobot.* 17 (Suppl. 1):S191-S200. doi: 10.1007/s00334-008-0174-6.
- Rubiales, J.M. Hernandez, L. Romero, F. & Sanz, C. (2010). The use of forest resources in central Iberia during the Late Iron Age. Insights from the wood charcoal analysis of Pintia, a Vaccaean oppidum, *J. Archae. Sci.* 38(1):1-10. doi:10.1016/j.jas.2010.07.004.

- Ruiz de la Torre, J. (1979). Arboles y arbustos de la Espania Peninsular. Univ. Politecnica de Madrid, Spain.
- Ryan, K.C. Rigolot, E. & Botelho, H. (1994). Comparative analysis of fire resistance and survival of Mediterranean and North-American conifers. In: Proceedings of the 12th Conference on Fire and Forest Meteorology, SAF Pub. 94-02. Society of American Foresters, Bethesda, pp. 701-708.
- Sabatia, C. & Burkhart, H.E. (2013). Height and Diameter Relationships and Distributions in Loblolly Pine Stands of Enhanced Genetic Material. For. Sci., 59(3), 278–289. <https://www.proquest.com/scholarly-journals/height-diameter-relationships-distributions/docview/1445273569/se-2>.
- Sabra, A. & Walter, S. (2001). Non-wood forest products in the Near East: A Regional and national overview. FAO. Forestry Department. Non-Wood Forest Product Program.
- Sammut, C. & Webb Geoffrey, I. (2011). School of Computer Science and Engineering, University of New South Wales, Sydney, Australia.
- Sanchez, C.A.L., Javier, G.V. & Fernando C.D. (2003). A height-diameter model for *Pinus radiata* D. Don in Galicia (Northwest Spain). Annals of Forest Science, 60(3), 237-245. doi: 10.1051/forest: 2003015.
- Savill, P. Evans, J. Auclair, D. & Falck, J. (1997). Plantation Silviculture in Europe. Oxford University Press, Oxford.
- Sbay, H. & Hajib, S. (2016). Le pin pignon une espèce de choix dans le contexte des changements climatiques. Centre de recherches forestières. Maroc.
- Schober, R. & Forstliche, E. (1960). Forstschtitte in der Forstwirtschaft. Munchen, F.Baueur BLV Verlagsgesellschaft, p. 131-155.
- Schönau, A.P.G. (1987). Problems in using vegetation or soil classification in determining forest site quality. S. Afr. For. J. 141, 13-18.
- Schumacher, F.X. (1939). A new growth curve and its application to timber yield studies. J. For. 37:819-820.
- Schweinfurth, G. (188). Further discoveries in the flora of ancient Egypt. Nature 29:312-315.
- Seltzer, P. (1946). Le climat de l'Algérie, Typo-litho, institut de météo et de Phys. Du globe de l'Université D'Alger, et une carte couleur H-T, 219 p.
- SEO., Société espagnole d'ornithologie. (1999). BirdLife. Talas de pinares-isla en Tierra de Campiñas en época de cria. Rev. Quercus 163:53.
- Sghaier, T, Palahi, M, Garchi, S. Bonet José, A. Ammari, Y. & Pique, M. (2012). Modeling dominant height growth in planted *Pinus pinea* stands in Northwest of Tunisia.

- International Journal of Forestry Research. Article ID 902381, 12 p.
doi:10.1155/2012/902381.
- Sharashkin, L. & Gold, M. (2004). Pine nuts: Species, products, markets, and potential for U.S. production. Northern Nut Growers Assoc. 95th Ann. Rep.: 53-64.
- Sharma, M. Amateis, R. & Burkhart, H. (2002). Top height definition and its effect on site index determination in thinned and unthinned loblolly pine plantations. Forest Ecology and Management, 168, 163-175.
- Siepielski, A.M. & Benkman, C.W. (2008). A seed predator drives the evolution of a seed dispersal mutualism. Proc. Roy. Soc. B. 275:1917-1925. doi: 10.1098/rspb.2008.0451.
- Silvertown, J.W. & Lovett-Doust, J. (1993). Introduction to Plant Population Biology. Blackwell Science, Oxford.
- Sjolte-Jørgensen, J. (1967). The influence of spacing on the growth and development of coniferous plantations. Int. Rev. For. Res. 2, 43-94.
- Skovsgaard, J.P. (2004). Forest measurements . Encycl. For. Sci. 2, 550-566.
- Skovsgaard, J.P. & Vanclay, J.K. (2008). Forest site productivity: a review of the evolution of dendrometric concepts for even-aged stands. Forestry, Vol. 81, No.1, 2008. doi:10.1093/forestry/cpm041.
- Skovsgaard, J.P. & Vanclay, J.K. (2013). Forest site productivity: A review of spatial and temporal variability in natural site conditions. Forestry, 86, p. 305-315.
- Sloboda, V.B. (1971). Zur Darstellung von Wachstumsprozessen mit Hilfe von Differentialgleichungen erster Ordnung. Freiburg, Germany: Mitteilungen der Badenwürttembergischen Forstlichen Versuchs und Forschungsanstalt.
- Specht, R.L. & Specht, A. (1999). Australian Plant Communities. Dynamics of Structure, Growth and Biodiversity. Oxford: Oxford University Press.
- Sprackling, J.A. (1973). Soil-topographic site index for Engelmann spruce on granitic soils in Northern Colorado and Southern Wyoming. USDA For. Serv. Res. Note RM-239, 4 p.
- Strub, M.R., Vasey, R.B. & Burkhart H.E. (1975). Comparison of diameter growth and crown competition factor in loblolly pine plantations. For. Sci., 21, 427-431. <https://www.academia.edu/22950080/>.
- Tapias, R. Gil, L. Fuentes-Utrilla, P. & Pardos, J.A. (2001). Canopy seed banks I Mediterranean pines of south-eastern Spain: A comparison between *Pinus halepensis* Mill., *P. pinaster* Ait., *P. nigra* Arn. and *P. pinea* L.J. Ecol. 89:629-638.

- Tesch, S.D. (1981). The evolution of forest yield determination and site classification. *For. Ecol. Manage.* 3, 169-182.
- Thavaud, (1979). Étude dendrométrique d'un cèdre échantillon dans le massif de Belezma .rapport de stage école d'agriculture de Poizy chovand. p 30.
- Thirgood, J.V. (1981). *Man and the Mediterranean forest. A history of resource depletion.* Academic Press, London.
- Tomback, D.F. & Linhart, Y.B. (1990). The evolution of bird-dispersed pines. *Evol. Ecol* 4:185-219.
- Tomé, M. (1989). *Modelação do crescimento da árvore individual em povoamentos de Eucalyptus globulus Labill. (1ª rotação). Região Centro de Portugal.* Ph.D. Thesis. Universidade Técnica de Lisboa, 230 p.
- Tomé, M. Soares, P. Barreiro, S. Iciar, A. Bollandasås, O.M. & Cañellas, I. (2019). Standardization of symbols for forest variables used in forest assessment and modelling. *Brazilian Journal of Forestry Research*, 39, 768.
- Trueb, L. (1999). *Fruchte und Nüsse aus aller Welt.* S. Hirzel Verlag, Stuttgart-Leipzig, Germany.
- Vabre-Durrieu, (1956). Le froid et les graines de quelques Abiétacées. *Trav. Lab. For.* Toulouse, 5(1). Art. 29, pp 6.
- Van Bogaert, R. Gauthier, S. Raulier, F., Saucier, J.P. Boucher, D. & Robitaille, A. (2015) Exploring forest productivity at an early age after fire: a case study at the northern limit of commercial forests in Quebec. *Can. J. For. Res.* 45, 579-593. doi: 10.1139/cjfr-2014-0273.
- Vanclay, J.K. & Henry, N.B. (1988). Assessing site productivity of indigenous cypress pine forest in southern Queensland . *Commonw. For. Rev.* 67, 53-64.
- Vanclay, J.K. (1994). *Modelling Forest Growth and Yield: Applications to Mixed Tropical Forests.* CAB International, Wallingford.
- Vanclay, J.K. (1992). Assessing site productivity in tropical moist forests. *For. Ecol. Manage.* 54, 257-287.
- Vásquez-Yanes, C. & Orozco-Segovia, A. (1993). Patterns of seed longevity and germination in the tropical rainforest. *Annual Review of Ecology and Systematics* 24: 69-87.
- Vendramin, G.G. Fady, B. Gonzalez-Martinez, S.C. (2008). Genetically depauperate but widespread: The case of an emblematic Mediterranean pine. *Evolution* 62(3):680-688.
- Vezina, P.E. (1963). More about the 'crown competition factor'. *Forestry Chronology*, 39, 313-317. <https://pubs.cif-ifc.org/doi/10.5558/tfc39313-3>.

- Von Wimpfen, F. (1836). Skov-Taxationen. C.A. Reitzel, København.
- Wakely, P.C. & Marrero, J. (1958). Five-year intercept as site index in southern pine plantations. *J. For.* 56, 332-336.
- Weetman, G.F. & Mitchell, S.J. (2013). "Silviculture," in *Forestry Handbook for British Columbia, 5th Edition*. Eds. S. B. Watts and L. Tolland (Vancouver, BC: The Forestry Undergraduate Society, Faculty of Forestry, UBC), 394-431.
- Weise, W. (1880). *Ertragstafeln für die Kiefer*. Verlag von Julius Springer, Berlin.
- Weiskittel, A.R. Hann, D.W. Kershaw, J.A. & Vanclay, J.K. (2011). *Forest Growth and Yield Modeling*; Wiley-Blackwell: Chichester, UK.
- Wenger, K.F. (1984). *Forestry Handbook*. 2nd ed (New York, NY: John Wiley & Sons, Inc).
- Wenk, G. Antanaitis, V. & melko, Š. (1990). *Waldetragslehre*. Deutsche Landwirtschaftsverlag, Berlin.
- West, P.W. (2009). *Tree and Forest Measurement*. Cham, Springer. 214 pp.
- Wetzstein H.Y. Zhang, Z. Ravid, N. Wetzstein, M.E. (2011). Characterization of attributes related to fruit size in pomegranate. *HortScience* 46(6): 908-912.
- Wiedemann, E. (1932). *Die Rotbuche 1931*. M. & H. Schaper, Hannover.
- Wiedemann, E. (1937). *Die fichte 1936*. M. & H. Schaper, Hannove.
- Wiedemann, E. (1951). *Ertagskundliche und waldbauliche Grundlagen der Forstwirtschaft*. J.D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt am Main.
- Wouters, P. & Lorent V. (2001). The cubing of standing trees on foot. *Royal Forestry Society of Belgium SLVA*, 6, 1-8.
- Zaoui, M. (2015). *Système d'information géographique et méthodologie multicritère pour le choix de sites de retenues collinaires : application pour la wilaya de Mostaganem, Algérie*. Thèse de doctorat, Université Abdelhamid Ibn Badis, Mostaganem (Algérie), 156 p.
- Zhang, Y. Chen, H.Y. & Reich, P.B. (2012). Forest productivity increases with evenness, species richness and trait variation: a global meta-analysis. *J. Ecol.* 100, 742-749. doi: 10.1111/j.1365-2745.2011.01944.x.

Annexes

Annexe 2. Relation entre la production fruitière et les paramètres dendrométriques du pin pignon

corrélation

	NC	PC	LC	DC	NG	PG	RG	NP	PP	RP	N/H	Cm	Cdom	G	Htm	Hdom	Hho	dho	Age
NC	1,000																		
PC	,596	1,000																	
LC	,504	,687	1,000																
DC	,572	,685	,941	1,000															
NG	,650	,822	,719	,726	1,000														
PG	,228	,671	,301	,288	,221	1,000													
RG	,255	,359	,288	,267	,434	,503	1,000												
NP	,572	,838	,749	,755	,855	,430	,426	1,000											
PP	,233	,677	,239	,218	,324	,850	,498	,360	1,000										
RP	,048	,185	,194	,172	,186	,349	,616	,493	,350	1,000									
N/H	-,839	-,613	-,498	-,564	-,716	-,233	-,385	-,639	-,243	-,162	1,000								
Cm	,886	,635	,524	,589	,634	,305	,246	,595	,260	,049	-,826	1,000							
Cdom	,838	,648	,502	,565	,625	,342	,260	,580	,309	,048	-,805	,984	1,000						
G	,733	,552	,428	,462	,479	,329	,164	,467	,277	,011	-,578	,922	,927	1,000					
Htm	,904	,636	,544	,612	,662	,249	,192	,607	,228	,024	-,878	,954	,931	,810	1,000				
Hdom	,842	,649	,572	,622	,682	,259	,233	,662	,235	,109	-,862	,860	,855	,698	,931	1,000			
Hho	,913	,629	,542	,589	,657	,241	,191	,597	,225	,020	-,860	,954	,932	,832	,975	,895	1,000		
dho	,838	,576	,453	,514	,565	,294	,256	,536	,262	,076	-,702	,934	,926	,912	,838	,762	,857	1,000	
Age	,886	,641	,520	,602	,655	,293	,261	,652	,252	,135	-,851	,953	,942	,831	,943	,907	,931	,886	1,000

