République Algérienne Démocratique et Populaire

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Université ABOUBEKR BELKAID – TLEMCEN

جامعة ابوبكر بلقايد- تلمسان

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, et Sciences de la Terre et de l'Univers

كلية علوم الطبيعة والحياة، وعلوم الأرض والكون

Département des Ressources Forestières

قسم الثروة الغابية

MÉMOIRE

Présenté par

Melle. BELGHITRI Wafae

En vue de l'obtention du

Diplôme de MASTER En FORESTERIE

Spécialité : Protection des Forets

Thème

Estimation de la biomasse et du carbone forestier par LiDAR Terrestre (cas de la forêt de Fontaghera Wilaya de Ain Temouchent)

Soutenu le 06/10/2026, devant le jury composé de :

Président	M. HADDOUCHE Driss	Prof	Université de Tlemcen
Examinateur	M. BENABDELLAH Mohamed	Prof	Université de Tlemcen
Encadreur	M. ABDELBAKI Amina	MCB	Université de Tlemcen
Co-Encadreur	M. BERRICHI Faouzi	Ingénieur en chef	CT

Année Universitaire : 2026/2027

Résumé :

Les méthodes conventionnelles d'inventaire forestier, bien que simples, présentent des limites en termes de précision et d'efficacité. En revanche, le scanner laser terrestre (LiDAR TLS) offre des modèles tridimensionnels détaillés permettant d'extraire des informations cruciales sur la structure des arbres, la productivité et la biodiversité, tout en favorisant une conservation durable et une estimation non destructive de la biomasse. Cette étude a été menée sur deux placettes d'échantillonnage à la ville de Beni Saf (wilaya d'Aïn Témouchent), réalisée à partir de données acquises au moyen d'un scanner laser terrestre (TLS) afin d'estimer avec précision la biomasse forestière à partir des paramètres structuraux et dendrométriques des arbres. Pour la première placette, les résultats montrent un diamètre à hauteur de poitrine (DBH) variant de 9,0 cm à 24,7 cm, des hauteurs de 4,651 m à 9,989 m, ainsi qu'un volume de tronc et de branches compris respectivement entre 0,026 - 0,251 m³ et 0,001 -0,602 m³. Sur la seconde placette, le DBH s'échelonne de 10,44 cm à 37,03 cm, les hauteurs de 4,48 m à 12,59 m, avec un volume total des grumes atteignant 11,92 m³ et un volume de branches de 17,09 m³. L'analyse de ces données permet de décrire la structure des placettes forestières, d'étudier les interactions entre les individus et d'établir des relations allométriques. La modélisation s'avère également être un moyen efficace et non destructif pour quantifier la distribution de la matière végétale. Les résultats de cette étude suggèrent que le LiDAR TLS s'avère un outil performant et indispensable pour aider les gestionnaires forestiers à prendre des décisions éclairées pour une utilisation durable des ressources.

Mots-clés : Inventaire forestier, Paramètres dendrométriques, LiDAR TLS, Modèles 3D,

Estimation of Forest Biomass and Carbon Using Terrestrial LiDAR

Abstract:

Conventional forest inventory methods, although simple, have limitations in terms of accuracy and efficiency. In contrast, terrestrial laser scanning (TLS LiDAR) provides detailed three-dimensional models that allow the extraction of crucial information on tree structure, productivity, and biodiversity, while promoting sustainable conservation and non-destructive biomass estimation. This study was conducted on two sampling plots in the city of Beni Saf (Aïn Témouchent Province), using data acquired by means of a terrestrial laser scanner (TLS) to accurately estimate forest biomass from the structural and dendrometric parameters of trees. For the first plot, the results show a diameter at breast height (DBH) ranging from 9.0 cm to 24.7 cm, heights ranging from 4.651 m to 9.989 m, as well as trunk and branch volumes ranging respectively from 0.026 - 0.251 m³ and 0.001 - 0.602 m³. In the second plot, DBH ranges from 10.44 cm to 37.03 cm, heights from 4.48 m to 12.59 m, with a total log volume reaching 11.92 m³ and a branch volume of 17.09 m³. The analysis of these data makes it possible to describe the structure of the forest plots, study interactions between individuals, and establish allometric relationships. Modeling also proves to be an effective and non-destructive means of quantifying the distribution of plant matter. The results of this study suggest that TLS LiDAR is an effective and essential tool for helping forest managers make informed decisions for the sustainable use of resources

Keywords: Forest inventory, Dendrometric parameters, TLS LiDAR, 3D models.

تقدير الكتلة الحيوية والكربون الغابيين باستخدام تقنية المسح بالليزر الأرضي(LiDAR TLS)

ملخص:

تتميز طرق الجرد الحراجي التقليدية، على الرغم من بساطتها، بعدة محدوديات من حيث الدقة والفعالية. في المقابل، يوفر المسح بالليزر الأرضي (LiDAR TLS) نماذج ثلاثية الأبعاد عالية التفصيل، تتيح استخراج معلومات أساسية حول بنية الأشجار وإنتاجيتها وتنوعها الحيوي، مع دعم جهود المحافظة المستدامة وتقدير الكتلة الحيوية بدون إتلاف للعنصر الحيوي.

أُجريت هذه الدراسة على قطعتين من العينات في مدينة بني صاف (ولاية عين تموشنت)، بالاعتماد على بيانات تم الحصول عليها باستخدام ماسح ليزري أرضي(TLS) ، بهدف التقدير الدقيق للكتلة الحيوية الحرجية انطلاقًا من المعلمات البنيوية و الدندرومترية للأشجار.

بالنسبة للقطعة التجريبية الأولى، أظهرت النتائج أن قطر الشجرة على ارتفاع الصدر (DBH) يتراوح بين 9.0 و24.7 سم، في حين تراوحت ارتفاعات الأشجار بين 4.651 و9.989 م. كما تراوح حجم الجذع وحجم الفروع على التوالي بين 0.026 و0.251 م^3 و0.001 و0.602 م^3.

أما في القطعة التجريبية الثانية، فقد تراوح قطر الشجرة على ارتفاع الصدر (DBH)بين 10.44 و37.03 سم، بينما تراوحت الارتفاعات بين 4.48 و12.59 م. وبلغ الحجم الإجمالي للأخشاب 11.92 م^3، في حين بلغ حجم الفروع 17.09 م^3.

تتيح دراسة هذه البيانات توصيف بنية القطع الحراجية، وتحليل التفاعلات بين الاشجار، وإقامة العلاقات الألوميترية. كما تمثل النمذجة ثلاثية الأبعاد وسيلة فعالة وغير إتلافية لتقدير وتحديد توزيع الكتلة النباتية.

وتشير نتائج هذه الدراسة إلى أن تقنية الماسح الليزري الأرضي تمثل أداة فعالة وذات أهمية كبيرة لدعم مسيري الغابات في اتخاذ قرارات مبنية على معلومات دقيقة، بما يسهم في الإدارة المستدامة للموارد الحراجية واستغلالها.

الكلمات المفتاحية: الجرد الحراجي؛ معايير الدندرومترية، المسح بالليزر الأرضي، النماذج ثلاثية الأبعاد؛ الكتلة الحيوية الحراجية.

Remerciements

Avant tout, je tiens à remercier ***Dieu*** *tout puissant de m'avoir accordé santé, courage, volonté et patience pour traverser les moments difficiles dans l'accomplissement de ce travail à terme. Mes remerciements les plus sincères vont à :*

Ma encadreur ***Madame RABAH FISSA Amina née ABDELBAKI*** *pour sa disponibilité, sa patience, et surtout ses conseils précieux qui ont alimenté ma réflexion et son soutien moral et intellectuel tout au long de ma démarche à la réalisation de ce travail.*

Mes sincères remerciements s'adressent à mon Co-encadreur, ***Monsieur Berrichi Faouzi****. Je le remercie chaleureusement pour son encadrement exemplaire tout au long de mon stage, pour la pertinence de ses idées partagées, ainsi que pour la confiance qu'il m'a accordée, ce qui a grandement enrichi ma formation et ce mémoire.*

Mes vifs remerciements vont aux membres de jury qui m'ont apporté leur jugement d'experts ***: Monsieur HADDOUCHE Driss*** *pour accepter d'examiner ce travail.* ***Monsieur DEHANE Belkheir****, pour accepter d'être membre au jury, et examiner ce travail.*

Au Chef du Département des Ressources Forestières monsieur ***BENSENANE Bachir****, pour son soutien constant et sa bienveillance. Que ce mémoire soit le reflet de notre respect pour votre travail remarquable à la tête de notre département.*

Je tiens à adresser mes remerciements les plus respectueux à ***Monsieur le Directeur du Centre des Techniques Spatiales (CTS) d'Arzew*** *pour avoir bien voulu accepter ma demande de stage au sein de son prestigieux établissement. Mes remerciements les plus sincères s'adressent également à toute l'équipe du centre pour leur accueil chaleureux, leur précieuse collaboration et le soutien technique qu'ils m'ont apporté tout au long de mon travail. »*

Dédicaces

À ceux dont mon cœur déborde d'amour... Dédicace et Reconnaissance

À la bougie qui s'est consumée pour éclairer mon chemin, à la main qui m'a soutenu à chaque fois ; ***mon cher père "Mohamed"*** *Je dédie le fruit de cette réussite à ta bienveillance et a tout ce que tu m'as apporté, à ta patience infinie face à mes exigences, et à ta présence à mes côtés à chaque instant, qui a été et restera le plus grand bienfait de ma vie.*

À une prière de gratitude incarnée sur terre, à celle qui résume le sens de la fidélité et du sacrifice ; ***ma tendre mère "GHALEM Fatima Zohra****... Toi qui ne m'as jamais abandonnée, sans jamais ressentir ni lassitude ni fatigue, merci de m'avoir poussée vers l'avant par ton soutien moral et tes prières silencieuses qui m'ont ouvert toutes les portes. À vous deux, sans qui je ne serais rien... Je dédie ce succès, car il est votre fruit avant d'être le mien.*

À l'exquis parfum du passé et à la bénédiction du présent ***; mon cher grand-père Mohammed****, toi qui as cru en moi à chaque étape et qui as estimé chacun de mes efforts, et à* ***ma chère grand-mère kALTOUM****, entourée d'amour et de bienveillance... Merci pour vos grands cœurs.*

À ceux en qui je puise ma force, mes compagnons de vie et de route ; ***mes sœurs et frères : Sarah, Inès, Anes****, ainsi que* ***Aissam et son épouse Hadjer****... Merci pour la chaleur de vos sentiments et votre soutien psychologique, qui a été pour moi une bouée de sauvetage dans les moments de fatigue.*

Mes remerciements les plus sincères s'adressent également à mes collègues et camarades de promotion, pour leur soutien indéfectible mais surtout pour tous les beaux souvenirs et les moments inoubliables partagés tout au long de ce parcours. Merci d'avoir rendu cette aventure académique aussi humaine et précieuse.

Toute personne qui a participé de près ou de loin afin d'achever la réalisation de ce mémoire soit sincèrement remerciée et tous mes enseignants que j'ai rencontré pendant mes années d'étude, je leur suis reconnaissante pour tout ce que j'ai appris.

Et à chaque main qui s'est tendue vers moi pour le bien, à chaque cœur sincère qui m'a soutenue et a prié pour moi tout au long de ce parcours... Je vous dédie le fruit de ce labeur avec une gratitude infinie.

Table des matières

Résumés

Remerciement

Dédicace

Liste des figures

Liste des photos

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Introduction générale

Chapitre I : Synthèse Bibliographique

I.1. Lidar terrestre ……...5

I.1.1. Notions générales sur le scanning ……5

I.1.2. Principe d'acquisition ……...5

I.1.3. Association d'information RVB aux points du nuage ……6

I.1.4. Caractéristiques techniques d'un scanner laser terrestre ……..6

I.1.5. Type de scanner ……7

I.1.6. Laser scanner Faro ……8

I.1.6.1. Acquisition des données ……9

I.1.6.2. Prétraitement ……9

I.1.6.3. Nettoyage et réduction du nuage de points ……9

I.1.6.4. Génération de surfaces 3D ……9

I.1.6.5. Visualisation et analyse ……9

I.1.6.6. Exportation des données ……9

I.2. Dendrométrie et estimation de volume ……10

I.2.1. Définition ……10

I.2.2. Les différentes parties d'un arbre ……...10

I.2.3. Mesure de la grosseur des arbres ……11

I.2.4. Mesure du diamètre ……11

I.2.5. Mesure de la circonférence ……12

I.3. Erreurs ……13

I.3.1. Instrumentales……..13
I.3.2. Erreurs de mesure ……...13
I.3.3. Détermination de la surface terrière ……13
I.3.4. Quelques cas particuliers ……13
I.4. Mesure de la hauteur des arbres ……14
I.4.1. Définition ……14
I.4.2. Méthodes et appareils de mesure ……15
I.4.3. Utilisation de perches de référence ……17
I.5. Détermination de la forme des arbres ……19
I.5.1 Forme théorique d'un arbre ……19

Chapitre II : Présentation de la zone d'étude

II.1. Situation géographique et présentation de la Wilaya de Ain Témouchent ……..27
II.1.1. Sur le plan administratif ……27
II.1.2. Sur le plan régional ……28
II.1.3. Sur le plan physique ……..28
II.2. Description de la Bande littoral de la Wilaya de Ain Temouchent ……..29
II.3. Description du milieu physique de la bande littorale de la Wilaya de Ain Temouchent..29
II.3.1. Topo-morphologie ……29
II.3.2. Occupation du sol ……30
II.3.3. Caractérisation générale des formations forestières ……30
II.3.4. Pédologie ……...31
II.3.5. Géologie ……32
II.3.6 Relief ……34
II.3.7 Hydrologie ……35
II.4. Importance forestière de la zone d'étude ……36
II.4.1. Exposition ……36
II.4.2. Pente ……..37
II.4.3. Le réseau routier ……38
II.5. Synthèse bioclimatique ……39

II.5.1. Précipitations ……40

II.5.1.1 Répartition mensuelle moyenne des précipitations ……41

II.5.1.2. Régime saisonnier des précipitations ……41

II.5.2. Température ……..42

II.5.2.1. Moyenne des minima du mois le plus froid « m » ……43
II.5.2.2. Moyenne des maximas du mois le plus chaud « M » ……43
II.5.2.3 Températures moyennes mensuelles (T°C) ……44
II.5.2.4. Amplitude thermique extrême moyenne ou indice de continentalité ……45
II.5.3. Indice de sécheresse estivale ……45

II.6. Diagramme ombrothermique de BAGNOUL et GAUSSEN ……...46

Chapitre III : Matériel et méthodes

III.1. Problématique et objectif ……50

III.2. Levée et traitements des données LiDAR terrestre ……51

III.2.1. Le LiDAR terrestre (TLS) ……51

III.3. Logiciels utilisés ……52

III.3.1. FARO SCENE 2019.0.0.1457 ……52

III.3.2. Computree ……52

III.3.3. Cloud compare ……52

III.3.4. Microsoft Excel ……52

III.4. Matériel utilisé ……52

III.4.1 Ordinateur portable ……..52

III.4.2 Scans LiDAR terrestres (FARO Focus S 150) ……52

III.4.3 Damiers ……53
III.4.4 Sphères ……..53

III.4.5 Compas forestier ……...53

III.4.6 Jalonnettes ……53

III.4.7 Décamètre ……54

III.5. Méthodologie adoptée ……54

III.5.1. Détermination des placette échantillonnage ……..……54

III.5.2. Acquisition des données TLS ……54

III.5.3. Traitement des données ……54

III.5.4. Extraction de la biomasse ……54
III.5.5. Validation des résultats ……54
III.6. Principes de base de l'échantillonnage forestier ……..55
III.6.1. Objectifs de l'échantillonnage forestier ……55
III.6.2. Types d'échantillonnage ……56
III.6.2.1. L'échantillonnage aléatoire stratifié ……..56
III.6.2.2. L'échantillonnage aléatoire stratifié ……..56
III.7. Taille de l'échantillon ……..58
III.8. Applications de l'échantillonnage ……...58
III.9. Levées des placettes d'échantillonnages par TLS……59
III.9.1. Levées des données TLS……..59
III.9.1.1. Méthodologie adoptée pour la compagne des scannes par TLS……...59
III.9.1.1.1. Protocole de mesure TLS……..…….60
III.9.1.1.2. Caractéristiques et emplacement des scannes de la placette……...60
III.9.1.1.3. Configuration des paramètres de numérisation du scanner FARO……..……60
III.9.1.1.4. Protocol d'organisation des sphères et damiers……61
III.9.1.1.5. Emplacement des sphères et les damiers……..……61

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV.1. Levée de la placette d'échantillonnages 1 ……..66
IV.1.1. Délimitation de la placette ……66
IV.1.2. Caractéristiques des scannes ……...66
IV.1.3. Description de placette d'échantillonnage……67
IV.2. Traitement de consolidation des scannes de la placette 1…….……..…….68
IV.2.1. Des données……..……68
IV.2.2. Visualisation des données……...……..68
IV.2.3. Traitement de consolidation des scannes ……68
IV.2.4. Enregistrement et consolidation des numérisations……...…70
IV.2.5. Évaluation de la précision de la consolidation des numérisations……..……..71
IV.2.6. Extraction de la placette échantillonnage :…….. 73
IV.2.7. Filtrage et nettoyage des numérisations ……...73

IV.3. Modélisation de la géométrie des arbres ……75
IV.3.1. Chargement et visualisation du nuage de points ……..75
IV.3.2. Validation visuelle……...…….76
IV.3.3. Extraction des arbres ……...…….76
IV.4. Estimation de la biomasse par modélisation 3D……..77
IV.4.1. Modélisation des arbres de la placette 1……...77
IV.4.2. Segmentation des arbres …….…….78
IV.4.3. Détection des cylindres bien ajustés par QSM…….81
IV.4.4. Exportateur de liste QSM…….82
IV.5. Levée de la placette d'échantillonnages 2 ……..…….83
IV.5.1. Délimitation de la placette…..……..……83
IV.5.2. Caractéristiques des scannes…….83
IV.5.3. Description des placettes d'échantillonnages…….……..84
IV.5.4. Traitement de consolidation des scannes de la placette 2……..84
IV.5.4.1. Importation des données ……..…….84
IV.5.4.2. Visualisation des données ……. …….……...…84
IV.5.4.3. Traitement des scannes ……..…….……..84
IV.5.5. Enregistrement et consolidation des numérisations……...…85
IV.5.6. Évaluation de la précision de la consolidation des numérisations……86
IV.5.6.1. Enregistrement avec des sphères et damiers……..86
IV.5.7Exploration des scannes……..87
IV.5.8. Extraction de la placette échantillonnage …...…….88
IV.5.9. Filtrage et nettoyage des numérisations……88
IV.5.10. Modélisation de la géométrie des arbres…….89
IV.5.11. Estimation de la biomasse par modélisation 3D ….…….……...……89
IV.5.11.1. Modélisation des arbres de la placette 2…….……..……..89
IV.6. Levée des paramètres dendrométriques par la méthode classique……..……...90
IV.6.1. Délimitation de la placette …….…….90
IV.6.2. Mesure du Diamètre et circonférence à Hauteur d'Homme (DBH …….. ……..91
IV.6.3. Mesure de la Hauteur Totale ……..…….……91

IV.6.4. Enregistrement des Données ……..…….……91
IV.7. Estimation de la biomasse forestière par l'utilisation des données TLS ……..……..94
IV.7.1. Problématique et objectifs …….…….94
IV.8. Placette échantillonnage 1 ….…….……94
IV.8.1. Validation des résultats par des arbres de référence de la placette 1 …….……97
IV.8.2. Validation des résultats de la placette 1 ….……..……..104
IV.8.3Analyses des résultats d'extraction de la biomasse placette 1 ...…...……...……104
IV.8.3.1. Diamètre à haute de poitrine (DBH)……104
IV.8.3.2. Hauteurs totales des arbres ……..……...104
IV.8.3.3. Volume des arbres …….……105
IV.8.3.4. La densité de la placette ……..106
IV.9. Placette échantillonnage 2 ……..……..107
IV.9.1. Validation des résultats par des arbres de référence de la placette 2 ……..……...109
IV.9.2. Validation des résultats de placette 2 .....….....……114
IV.9.3. Analyse des résultats d'extraction de la biomasse placette 2 ……...…….115
IV.9.3.1. Diamètre à hauteur de poitrine (DBH) ……115
IV.9.3.2. Hauteurs totales des arbres ……..……...……115
IV.9.3.3. Volume des arbres ……..116
IV.9.3.4. La densité de la placette ……..…….…..117
Conclusion générale
Références Bibliographiques

Liste des figures :

Figure I.1 : Mesure des coordonnées des points par un scanner laser 6

Figure I.2 : Exemple des capteurs lasers terrestres à temps de vol (Leica C10) 7

Figure I.3 : Exemples des scanners lasers à différence de phase 8

Figure I.4 : Compas forestier 12

Figure I.5 : Conventions à adopter en fonction de la topographie et de la morphologie des arbres 14

Figure I.6 : Différent type de coupes 15

Figure I.7 : Hauteur mesurée par l'intermédiaire de mesures de distances 17

Figure I.8 : Utilisation de perches de référence pour la mesure de hauteur : première méthode 18

Figure I.9 : Utilisation de perches de référence pour la mesure de hauteur : deuxième méthode 19

Figure I.10 : Décomposition schématique d'une tige en solides géométriques (in Rondeux J.1993) 19

Figure II.1 : Répartition du Territoire de la Wilaya d'Ain Temouchent 28

Figure II.2 : Superficie forestière de la wilaya d'Ain Temouchent 31

Figure II.3 : Carte géologique de la zone de Béni-Saf 33

FigureII.4 : Carte de relief de la zone de beni saf 34

FigureII.5 : Localisation de la forêt domaniale de Fontaghera. 35

Figure II.6 : Carte du réseau hydrographique de la zone d'étude 36

Figure II.7 : Expositions des versants de la forêt domaniale de Fantaghéra. 37

FigureII.8 : Classes de pentes de la forêt domaniale de Fantaghéra 38

Figure II.9 : Carte des infrastructures de la commune de Beni saf 39

Figure II.10 : Répartition des moyennes mensuelles des pluies station Béni Saf (1913-1938) (1980-2004) et (2005-2015) 41

Figure II.11 : Régimes des moyennes saisonnières des précipitations de la station Béni Saf (1980-2004) et (2005-2015) 42

Figure II.12 : Températures moyennes mensuelles station Béni saf (1913-1938), (1980-2004) et (2005-2015) 45
Figure II.13 : Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen (1913-1938) 46
FigureII.14 : Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen (1980-2004) 47
Figure II.15 : Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen (2005-2015) 47
Figure III.1 : Organigramme méthodologique 55
Figure III.2 : Répartition des placettes d'échantillonnages 58
Figure III.3 : Dimensions de la placette d'échantillonnage 59
Figure III.4 : Carte de densité de la placette échantillonnage 1 60
Figure III.5 : Carte de densité de la placette échantillonnage 2 60
Figure III.6 : Organisation des scannes de la placette échantillonnage 62
Figure III.7 : Organisation des sphères et damiers sur la placette échantillonnage 63
Figure IV.1 : Délimitation de la placette 1 sur terrain 66
Figure IV.2 : Répartition des scannes sur la placette 1 67
Figure IV.3 : Visualisation des scannes de la placette 1 dans Faro Scène 68
Figure IV.4 : Les sphères et les damiers utilisé durant l'étape de consolidation 70
Figure IV.5 : Consolidation et modélisation 3D de la placette 71
Figure IV.6 : Extraction de la placette d'échantillonnage 1 73
Figure IV.7 : Nettoyage des numérisations de la placette 1 75
Figure IV.8 : Chargement des nuages de points 76
Figure IV.9 : Extraction des arbres 77
Figure IV.10 : L'interface utilisateur de Computree 78
Figure IV.11 : procédures principales pour la segmentation des arbres 78
Figure IV.12 : résultats de la Correction allométrique par QSM 81
Figures IV.13 : Extraction des paramètres dendrométriques 82
Figure IV.14 : Exportation des résultats 82
Figure IV.15 : Délimitation de la placette 2 sur terrain 83
Figure IV.16 : Répartition des scannes sur la placette 2 83
Figure IV.17 : Les sphères et les damiers utilisé durant l'étape de consolidation 85

Figure IV.18 : Consolidation et modélisation 3D de la placette 86

Figure IV.19 : Vue 3D de la placette 2 sous Faro 87

Figure IV.20 : Extraction de la placette d'échantillonnage 2 88

Figure IV.21 : Nettoyage des numérisations de la placette 2 89

Figure IV.22 : Délimitation de la placette 2 sur terrain 90

Figure IV.23: A gauche : compas forestier conçue/ A droite : Mesure du Diamètre 91
Et circonférence à Hauteur d'Homme (DBH à 1.30 m)

Figure IV.24 : Marquages des arbres levées 92

Figure IV.25 : Les arbres de validation de la placette 1 98

Figure IV.26 : Diamètres des arbres de validation à 1.30 (cm) 99

Figure IV.27 : Les hauteurs des arbres de validation 100

Figure IV.28 : Comparaison entre volume inventorie et estimé à 1.30m 101

Figure IV.29 : Volumes des arbres de validation à 1.30 m 102

Figure IV.30 : Répartition des diamètres des arbres de la placette1 104

Figure IV.31 : Répartition des Hauteurs des arbres de la placette 1 105

Figure IV.32 : Répartition des volumes des arbres de la placette 1 106

Figure IV.33 : Les arbres de validation de la placette 2 110

Figure IV.34 : Diamètres des arbres de validation à 1,30 (m) 111

Figure IV.35 : Hauteurs des arbres de validation 112

Figure IV.36 : Volumes des arbres de validation à 1,30 (m) 113

Figure IV.37 : Répartition des diamètres des arbres de la placette 2 115

Figure IV.38: Répartition des hauteurs des arbres de la placette 2 116

Figure IV.39 : Répartition des volumes des arbres de la placette 2 116

Liste des photos

Photo II.1 : Forêt domaniale de Fantaghera 36

Photo III.1 : LiDAR terrestre utilisé lors de cette étude (Faro Focus S) 53

Liste des tableaux

Tableau II.1 : Les Daïras et les communes de la wilaya de Ain Témouchent 27/28

Tableau II.2 : situation de poste météorologique 40

Tableau II.3 : Précipitations moyennes mensuelles et annuelles 41

Tableau II.4 : Comparaison du régime saisonnier des deux périodes de Béni Saf 42

Tableau II.5 : Les températures annuelles 43

Tableau II.6 : Températures moyennes mensuelles (Béni saf) 44

Tableau II.7 : Indice de sécheresse des stations de référence (Is) 46

Tableau III.1 : Nombre des placettes 57

Tableau IV.1 : Evaluation de l'enregistrement 72/73

Tableau IV.2 : Evaluation de l'enregistrement 86/87

Tableau IV.3 : Paramètres dendrométriques inventorie sur terrain 92/93/94

Tableau IV.4 : Paramètres dendrométriques de la placette1 par modélisation de la placette 1 94/95/96

Tableau IV.5 : Diamètres des arbres de validation à 1,30 (cm) 98

Tableau IV.6 : Les hauteurs des arbres de validations 99

Tableau IV.7 : Volume des arbres de validation de la placette 1 100

Tableau IV.8 : Estimation de la précision du volume des arbres de validation 101

Tableau IV.9 : Densité de la placette par surface terrière de la placette 1 107

Tableau IV.10 : Paramètres dendrométriques de la placette1 par modélisation de la placette 2 107/108/10

Tableau IV.11 : Diamètre (DBH) 110

Tableau IV.12 : Hauteurs 111

Tableau IV.13 : Arbres référence de validation de la placette 2 112

Tableau IV.14 : Volumes 113

Tableau IV.15 : Densité de la placette par surface terrière de la placette 2 118

Liste des abréviations

Abréviation	Désignation
LiDAR	Light Detection And Ranging (détection et télémétrie par laser)
TLS	Terrestrial Laser Scanning (balayage laser terrestre)
ALS	Airborne Laser Scanning (balayage laser aéroporté)
RVB / RGB	Rouge Vert Bleu / Red Green Blue
HDR	High Dynamic Range (imagerie à grande dynamique)
GPS	Global Positioning System (système de positionnement global)
SIG	Système d'Information Géographique
LAS, XYZ, OBJ	Formats d'export des nuages de points
C10	Modèle de scanner Leica (Leica C10), à temps de vol
DBH	Diameter at Breast Height (diamètre à hauteur de poitrine, à 1,30 m)
DHP	Diamètre à Hauteur de Poitrine (équivalent français de DBH)
QSM	Quantitative Structure Model (modèle quantitatif de structure des arbres)
LAI	Leaf Area Index (indice de surface foliaire)
TreeIso	Individual-Tree Isolator (outil d'isolement d'arbres individuels)
PCL	Point Cloud Library (bibliothèque de traitement de nuages de points)
3D	Tridimensionnel
SCENE	FARO SCENE, logiciel de traitement des scans FARO
GNU GPL	Lesser General Public License (licence de Computree)
RAM	Random Access Memory (mémoire vive)
CTS	Centre des Techniques Spatiales (Arzew)
ONF	Office National des Forêts
RDI	Recherche, Développement et Innovation (département de l'ONF)
ONM / O.N.M	Office National de la Météorologie
D.P.S.B	Direction de la Programmation et du Suivi Budgétaire
A.N.A.T	Agence Nationale d'Aménagement du Territoire (à vérifier)
DTAAT	Direction du Tourisme et de l'Artisanat d'Ain Temouchent

A.F.N.O.R.	Association Française de Normalisation
C.F.A.T	Conservation des Forêts de Ain Temouchent
NF / N.F.	Norme Française
EN	Norme Européenne
RN	Route Nationale
ISPRS	International Society for Photogrammetry and Remote Sensing
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ICCVG	International Conference on Computer Vision and Graphics
OPU	Office des Publications Universitaires
g	Surface terrière (m^2)
h / H	Hauteur de l'arbre
L	Longueur de la grume
Dm	Diamètre médian
Cm	Circonférence médiane
d0, ds	Diamètre à la base et diamètre au sommet

SP, AS, AP, OA, OE, BC, BE, EC Points et segments de la figure géométrique de la mesure de hauteur par distances (section I.4.2)

cm, m, mm, km	Centimètre, mètre, millimètre, kilomètre
m^2 / m^3	Mètre carré / mètre cube
Km2	Kilomètre carré
Ha	Hectare
°C	Degré Celsius

Introduction générale

La détermination précise des ressources forestières est l'une des tâches les plus importantes de la gestion durable des forêts. Des informations précises sur les ressources permettent de planifier les activités économiques et de conservation actuelle et future. Ces connaissances sont également nécessaires pour la mise en œuvre de politiques de gestion durable des forêts. Selon l'objectif, la disponibilité des ressources financières et la précision requise, de nombreuses méthodes d'inventaire forestier se distinguent. En raison du coût élevé et du temps nécessaire au travail sur le terrain, les forestiers utilisent souvent des méthodes statistiques et mathématiques basées sur des mesures sur des placettes d'échantillonnage circulaires.

Les équipes de terrain mesurent généralement des caractéristiques telles que le diamètre à hauteur de poitrine (DHP) et la hauteur des arbres, et déterminent l'espèce et l'emplacement de chaque arbre par rapport au centre de la placette d'échantillonnage. La nature chronophage du travail sur le terrain avec des outils conventionnels (par exemple, pied à coulisse, compas, altimètre) conduit à la recherche de nouvelles alternatives.

Solutions qui réduisent le coût et l'intensité de la main-d'œuvre de l'inventaire et augmentent son objectivité. Ces dernières années, un certain nombre d'articles scientifiques ont été publiés sur l'utilisation des technologies de télédétection pour les inventaires forestiers, en particulier la détection et la télémétrie (LiDAR) technologique. Le produit de cette technologie est une image tridimensionnelle de la réalité, composée de millions de points qui forment un « nuage de points ». Cela permet une mesure précise des dimensions et de la structure des objets scannés **(Będkowski, 2004, p. 20; Wężyk, 2006)**.

Les scanners laser sont intégrés à différents types de plates-formes, par ex. plate-forme aérienne – balayage laser aéroporté (ALS) ou trépied de relevé stationnaire – à balayage laser terrestre (TLS). Dans la gestion forestière, en raison de l'immensité des zones forestières, la collecte de données par la technologie ALS est le plus souvent envisagée, car elle fournit des données pour des zones forestières entières dans un court laps de temps **(Chmielewski et al., 2010)**. De nombreux articles ont été écrits sur les « inventaires forestiers améliorés » qui utilisent les données ALS avec des mesures de terrain. Pour estimer les caractéristiques des peuplements de compartiments forestiers individuels avec une grande précision **(White et al., 2016).**

Dans certains pays, les méthodes d'inventaire forestier ALS sont utilisées dans la pratique forestière, par ex. Norvège, Finlande, Danemark et Suède **(Kangas et al., 2018)**. La méthode d'inventaire forestier la plus couramment utilisée à l'aide des données ALS est l'« approche par

zone » , qui utilise des relations entre les caractéristiques des nuages de points et les mesures au sol à l'aide de méthodes statistiques **(Næsset, 2002, p. 200; White et al., 2013).**

Cette méthode permet de développer un modèle prédictif pour chaque caractéristique du peuplement enquêté déterminée à partir des mesures de terrain. Une fois les modèles mathématiques développés, l'étape finale consiste à les appliquer à l'ensemble de la zone scannée. L'ALS permet d'obtenir rapidement et avec relativement peu d'efforts des données sur de vastes zones. De plus, l'utilisation de l'ALS avec les données de terrain nécessite un plus petit nombre de placettes d'échantillonnage par rapport à la méthode statistique et mathématique traditionnelle, tout en maintenant la précision supposée des estimations **(Sterenczak et al., 2018)**.

Cependant, il convient de souligner que cette méthode nécessite certaines mesures de terrain pour calibrer le modèle statistique, car les parties ligneuses de la végétation, y compris les tiges, ne peuvent pas être observées directement à l'aide de la technologie ALS **(White et al., 2016**). Les données TLS sont une source de données complémentaire pour les mesures aéroportées. Les données TLS représentent l'image d'un peuplement vu du sol sous la canopée des arbres. Le résultat de l'utilisation de TLS est un nuage de points très dense avec une précision de mesure en millimètres **(Zawila-Niedzwiecki et al., 2008).**

Par conséquent, cette technologie est considérée comme la source la plus précise de données de télédétection pour les placettes d'échantillonnage **(Liang et al., 2016)**. Un avantage supplémentaire de l'utilisation de TLS est le moyen automatisé et très rapide d'obtenir des données. L'utilisation de TLS en foresterie a une histoire relativement courte. Le premier scanner laser terrestre a été introduit en 1998 **(Liang et al., 2016)**. Des travaux scientifiques pionniers sur l'utilisation du TLS en foresterie ont eu lieu au tournant des 20e et 21e siècles **(Aschoff & Spiecker, 2004; Henning & Radtke, 2006; Tanaka et al., 1998)**.

L'impulsion principale pour l'utilisation du TLS en foresterie était initialement d'améliorer le travail de terrain sur les placettes d'échantillonnage en remplaçant certaines des mesures manuelles. Les premiers travaux portaient sur des solutions automatiques ou semi-automatiques basées sur les données TLS visant à mesurer les caractéristiques biométriques de base des arbres, telles que le DHP, la hauteur et l'emplacement **(Brolly & Kiraly, 2009, 2009; Maas et al., 2008)**.

Avec la puissance de calcul croissante des ordinateurs et le développement d'algorithmes de traitement de données, de nouvelles opportunités se sont présentées pour l'utilisation des

données TLS. Ils sont devenus une précieuse source d'information, permettant la mesure automatique des caractéristiques biométriques qui auparavant ne pouvaient pas être mesurées directement à l'aide des méthodes traditionnelles d'inventaire forestier.

De nombreux articles ont été publiés sur les méthodes de détermination automatique du volume et de la biomasse des arbres sur la base des données TLS, dans lesquels les auteurs rapportent une précision comparable aux meilleures équations allométriques nationales **(Astrup et al., 2014; Liang et al., 2013)** . Le potentiel de cette technologie a également été reconnu dans la recherche en écologie forestière. L'adéquation du TLS a été démontrée pour déterminer le LAI (indice de surface foliaire) et étudier la dynamique des changements dans les trouées de peuplement et la structure de la cime **(Liang et al., 2016)**. Des centres scientifiques polonais ont également étudié l'utilisation du TLS en foresterie. Pour plusieurs années. Ces études concernent principalement des questions d'inventaire forestier **(Chirrek et al., 2007; Chmielewski et al., 2010; Wezyk et al., 2007)**, mais aussi comme la détermination du DHP distribution **(Zasada & Sterenczak, 2013)**, inventaire de la verdure urbaine **(Tompalski, 2009)** et suivi de l'état des arbres des monuments naturels **(Wężyk et al., 2015)**.

Ce projet basé sur l'utilisation de la technologie TLS menées dans arbre est debout depuis environ 20 ans. Les travaux se sont concentrés en particulier sur les aspects pratiques de l'utilisation de la technologie ALS et TLS pour l'inventaire forestier et sur la synthèse de la précision de mesure obtenue des principales caractéristiques biométriques des arbres. Dans les résultats, ils évaluent la possibilité d'introduire cette technologie dans la pratique forestière.

Afin de répondre aux objectifs de cette étude et d'évaluer l'apport du LiDAR terrestre dans l'estimation des caractéristiques dendrométriques des arbres, le présent mémoire est structuré en quatre chapitres principaux :

- Le premier chapitre : consacré au cadre théorique et aux généralités sur la télédétection, le LiDAR et son application en foresterie ;
- Le deuxième chapitre présentant la zone d'étude et ses principales caractéristiques ;
- Le troisième chapitre décrivant le matériel utilisé ainsi que les différentes étapes de la méthodologie adoptée ;
- Enfin, un quatrième chapitre consacré à la présentation, l'analyse et la discussion des résultats obtenus à partir des données TLS.

Chapitre I : Synthèse Bibliographique

I. Lidar terrestre

I.1.1 Notions générales sur le scanning

Le balayage laser terrestre est une technique d'acquisition de données utilisant la lumière laser pour mesurer directement, selon une trame régulière, les coordonnées 3D des points sur des surfaces depuis une position terrestre **(Pfeifer & Briese, 2007)**. Il consiste en une acquisition rapide, automatique et exhaustive des données couvrant une surface large, complexe, et inaccessible. L'émission du laser est effectuée à des fréquences élevées permettant l'acquisition de plusieurs milliers de points dans un laps de temps très court. Les mouvements nécessaires aux déplacements du rayon laser sont mesurés avec précision et permettent de déduire le positionnement dans l'espace de tous les points d'impact du laser. Le scanner laser capte également l'intensité de chaque impulsion. Le scanner est en plus doté d'une caméra numérique, à chaque impulsion laser est associées des valeurs de couleur RVB **(Rouge Vert Bleu).**

I.1.2 Principe d'acquisition :

Le scanner mesure la distance entre le scanner et des points sur la surface de l'objet, ainsi que l'angle horizontal et vertical, les coordonnées polaires de chaque point sont définies dans un référentiel relatif au scanner ou dans le système global si le SLT dispose d'un GPS intégré.

Les angles d'orientation du rayon laser du balayage s'effectue selon une trame régulière, c'est-à-dire que l'utilisateur fixe les deux pas angulaires : le pas vertical et le pas horizontal qui décrivent la résolution spatiale.

L'ensemble des points obtenus à partir de chaque configuration sont référencés au système de coordonnées interne de l'instrument, c'est-à-dire le scanner (Figure I.1). Ce système de coordonnées peut être défini comme suit :

Origine : Centre électro-optique de l'instrument,

Axe Z : Le long de l'axe vertical (rotation) de l'instrument,

Axe X : Le long de l'axe optique de l'instrument avec un angle horizontal arbitraire,

Axes-Y : Orthogonal aux deux axes précédents.

Les coordonnés sont calculés selon la relation suivante :

$$X_p = R.cos\theta.cos\varphi$$
$$Y_p = R.cos\theta.sin\varphi$$
$$Z_p = R.sin\theta$$

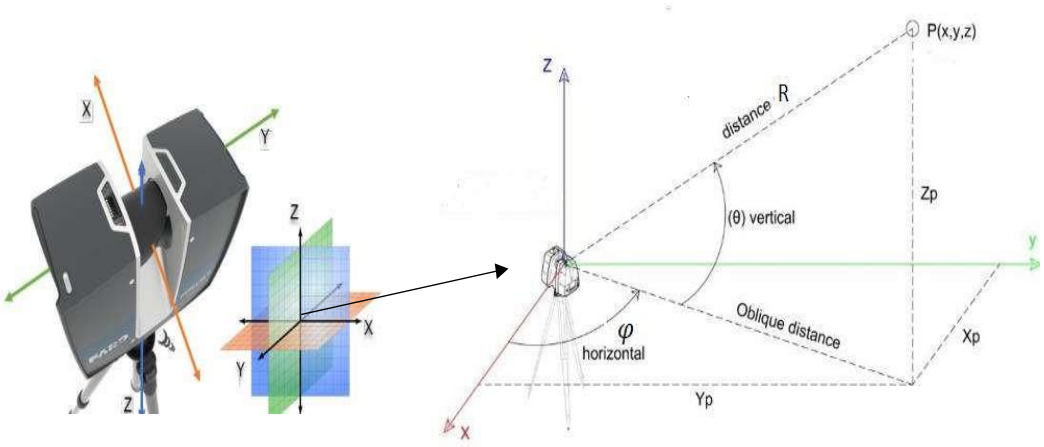


Figure I.1 : Mesure des coordonnées des points par un scanner laser

I.1.3 Association d'information RVB aux points du nuage :

Un scanner laser enregistre les coordonnées, l'intensité et en général aussi des valeurs RVB pour chaque point. L'intensité laser représente la capacité d'un objet à réfléchir le rayonnement laser incident. Les valeurs RVB associées à chaque point du nuage sont quant à elles extraites d'une image numérique acquise sur l'objet scanné, à partir d'une caméra numérique, le plus souvent intégrée à l'appareil. Le nuage de points reflète alors d'une manière réaliste l'objet scanné.

I.1.4 Caractéristiques techniques d'un scanner laser terrestre :

Les spécifications de précision données par les constructeurs de scanners laser sont généralement établies dans des conditions idéales de mesures. Les expériences montrent que ces précisions surestiment souvent celles atteintes dans des conditions réelles. De plus, elles varient d'un instrument à l'autre et dépendent de la calibration et du soin avec lequel les instruments sont manipulés. Pour pouvoir estimer la précision de chaque point d'un levé effectué par un capteur laser, il faut considérer l'ensemble des caractéristiques qui peuvent influencer la qualité des données produites par les appareils utilisés. Cette partie a été rédigée notamment grâce aux travaux de **(Boehler et al., 2003)**. A noter les principales caractéristiques :

- Précision angulaire
- Précision/exactitude sur les mesures de distances
- Taille de l'empreinte laser
- Portée

- Vitesse de balayage
- Et la sécurité

I.1.5 Type de scanner :

Scanners laser à impulsions :

En anglais, cette méthode d'acquisition est appelée « pulse method ». Les scanners laser « à impulsions » sont, dans le langage courant, nommés scanners lasers « à temps de vol ». Ils sont équipés de distancemètres.

Cette technologie utilise la mesure du temps de parcours (ou temps de « vol ») d'un rayon lumineux laser entre le scanner et le point d'impact sur l'objet visé. Les dispositifs de mesure sont liés à un système mécanique (miroir oscillant actionné par un moteur) permettant le balayage de l'objet étudié

Les scanners lasers à moyenne et longue portée fournissent une incertitude sur la mesure de distance entre 5 mm et 50 mm sur une portée de 50 m (Figure I.2).



Figure I.2 : Exemple des capteurs lasers terrestres à temps de vol (Leica C10)

Scanners laser à mesure de différence de phase :

En anglais, cette méthode d'acquisition par mesure de différence de phase est appelée « phase shift méthode ». La mesure de distance par comparaison de phase consiste à diriger vers l'objet le faisceau d'un laser (continu, de forte intensité et modulé de façon sinusoïdale) et à comparer les phases des ondes émises avec celle des ondes retour. La différence de phase entre le signal émis et le signal reçu est mesurée à l'aide d'un phasemètre numérique. Cette technique est similaire à la mesure de distance électronique au tachéomètre (Figure I.3).



Figure I.3 : Exemples des scanners lasers à différence de phase

I.1.6 Laser scanner Faro :

Le Faro Focus S150 ultra-portable offre une méthode qui utilise le laser pour déterminer la distance entre un capteur et un objet ou une surface, comme le sol ou la végétation. Le LiDAR terrestre est employé dans le cadre de l'inventaire forestier afin de collecter des informations précises sur la structure de la forêt, la topographie du sol, et les caractéristiques individuelles des arbres.

Cet instrument est caractérisé par :

- Haute précision : ±1mm.
- Haute vitesse : 976 000 points/seconde
- Commandes intuitives via l'écran tactile intégré
- Grande mobilité du fait de sa petite taille, de son faible poids et de la batterie à charge rapide intégrée
- La méthode d'imagerie High Dynamic Range (HDR) fusionne les images capturées avec différents paramètres d'exposition en une image unique présentant une plage dynamique de luminosité supérieure.
- Numérisations couleur 3D photo-réalistes grâce à la caméra couleur intégrée.
- Compensateur à deux axes intégrés pour ajuster automatiquement le niveau des données de numérisations capturées,
- Capteur GPS intégré permettant de déterminer la position du scanner.

- **Traitements des données TLS**

Le traitement des données LiDAR issues d'un scanner terrestre, comme le FARO scanner, suit généralement plusieurs étapes clés pour transformer les nuages de points bruts en données exploitables. Voici un aperçu des principales étapes du traitement des données LiDAR :

I.1.6.1. Acquisition des données

Le FARO scanner capture des millions de points 3D de l'environnement avec une très haute précision. Les données sont stockées sous forme de nuages de points bruts.

I.1.6.2. Prétraitement

Filtrage des points bruts : Suppression des points aberrants, du bruit, et des artefacts (comme les interférences ou les objets indésirables).

Alignement des scans multiples : Si plusieurs scans ont été réalisés, on utilise des techniques de registration pour aligner les différentes prises de vue en un seul ensemble homogène.

Méthodes d'alignement : Utilisation de cibles (sphériques, damier et planes).

I.1.6.3. Nettoyage et réduction du nuage de points

Réduction de la densité : Pour alléger les fichiers, on peut réduire la densité du nuage de points tout en conservant les caractéristiques géométriques importantes.

I.1.6.4. Génération de surfaces 3D

Création d'un maillage : On peut convertir le nuage de points en une surface 3D (maillage triangulé) pour des utilisations plus avancées (modélisation, analyse, etc.).

I.1.6.5. Visualisation et analyse

Colorisation : Les nuages de points peuvent être colorisés en utilisant des données RGB

Analyse des distances et volumes : Calcul des distances, mesures de volumes ou autres analyses topographiques à partir des données du nuage de points.

I.1.6.6. Exportation des données

Les données traitées peuvent être exportées dans divers formats (LAS, XYZ, OBJ, etc.) pour des analyses ultérieures, ou intégrées dans des logiciels SIG (Systèmes d'Information Géographique) pour des études de terrain.

- **Inventaire forestier et estimation de la biomasse forestière**

L'inventaire d'aménagement, mené classiquement par les forestiers aménagistes, consiste essentiellement en l'analyse descriptive et dendrométrique des peuplements forestiers. Il doit fournir les renseignements nécessaires pour la préparation des plans d'aménagement relativement intensifs de surfaces limitées. Il est destiné à estimer le volume de bois sur pied et les potentialités des peuplements. L'estimation des volumes par essence doit se réaliser pour chaque peuplement individuel à l'intérieur de la forêt et les différentes stations doivent être reconnues. Il existe deux grandes catégories de méthodes pour estimer le volume des arbres sur pied : estimation directe par mesure du défilement et estimation indirecte par tarifs de cubage. Bien qu'elle soit coûteuse, la mesure directe du défilement est la plus exacte puisqu'elle prend en compte la forme réelle de la tige : il est reconnu depuis longtemps que pour un diamètre et une hauteur donnée, le volume d'un arbre est intimement lié à sa forme **(Hoyer, 1985).**

I.2. Dendrométrie et estimation de volume

I.2.1 Définition

La dendrométrie est le procédé de mesure des arbres afin d'estimer la hauteur, le volume et la forme d'arbres de forêts naturelles ou de plantation. La dendrométrie a pour buts la caractérisation et la mesure des arbres (grosseur, hauteur, forme, âge, volume, épaisseur de l'écorce) et des peuplements (valeurs moyennes de la grosseur et de la hauteur, densité, volume moyen, facteur d'élancement, tarifs de cubage, notions d'accroissements, productivité).

I.2.2 Les différentes parties d'un arbre

Les essences forestières.

Dans le jargon des forestiers, une essence forestière désigne généralement une espèce d'arbre, mais c'est parfois une sous-espèce ou variété qui présente un intérêt en sylviculture et qui a des exigences biologiques ou des emplois particuliers.

Les forestiers distinguent ainsi :

- Selon la classification botanique, les feuillus, espèces généralement à feuillage caduc, qui sont des angiospermes, et les résineux (à feuillage persistant, à l'exception des mélèzes), qui sont des gymnospermes.
- Selon leur origine, les essences indigènes ou spontanées, par opposition aux essences introduites ou exotiques.

- Selon la morphologie de leur système racinaire : les essences à enracinement pivotant (qui réclament des sols profonds) de celles à enracinement superficiel ou traçant ;
- Selon leur biologie :

➢ Les essences rustiques ou non rustiques, selon leur degré de résistance aux variations climatiques.

➢ Les essences d'ombre ou de lumière, selon leur capacité à croître sous le couvert ou non.

➢ Les essences calcifuges ou calcicoles, acidiphiles ou neutrophiles, selon leurs exigences par rapport à la nature du sol.

➢ Les essences hygrophiles ou xérophiles, selon leur exigence en humidité ou leur adaptation à la sécheresse.

- Selon leur durée de vie utile, les essences longées vives (250 à 300 ans) ou peu longées vives.

Selon leur comportement en association : les essences dominantes, appelées aussi essences sociales, car elles sont capables de former des peuplements importants, et les essences subordonnées, souvent rencontrées en peuplements disséminés.

I.2.3 Mesure de la grosseur des arbres

La grosseur d'un arbre peut être exprimée au moyen de trois grandeurs : le diamètre, la Circonférence et la surface terrière. Le diamètre et la circonférence sont généralement mesurés à « hauteur d'homme », c'est-à-dire à 1,3 m. La surface terrière correspond à la surface de la section de l'arbre située à 1,3 m.

I.2.4 Mesure du diamètre

➢ **Les instruments de mesure**

Le diamètre des arbres abattus ou sur pied peut être mesuré avec le compas forestier, le compas finlandais, le pentaprisme ou le Relascope de Bitterlich.

➢ **Le compas forestier**

Ce compas mesure le diamètre d'un arbre sur pied. Le compas forestier est composé d'une règle graduée et de deux bras parallèles : l'un fixe, l'autre coulissant. Le compas doit être tenu perpendiculairement à l'axe de l'arbre, le bras fixe et la règle accolés au tronc, pour glisser

ensuite le bras coulissant contre le tronc. Le bras coulissant doit glisser aisément tout en restant strictement perpendiculaire à la règle. La mesure se fait généralement au centimètre près (arrondir au centimètre le plus proche). Certains compas, appelés compas forestiers compensés, portent sur la règle, une graduation en classes de diamètres de 5 en 5 cm (ex : la classe des 10 cm comprend les arbres allant de 7,5 cm à 12,5 cm ...). Des graduations en circonférences ou en classes de circonférences peuvent également figurer sur la règle. Notons que le fût des arbres n'est pas toujours d'une section bien circulaire : le diamètre est variable selon son orientation et l'on ne peut alors se contenter d'une seule mesure (figure I.4). Il existe actuellement des compas munis d'un système d'enregistrement automatique de la mesure.

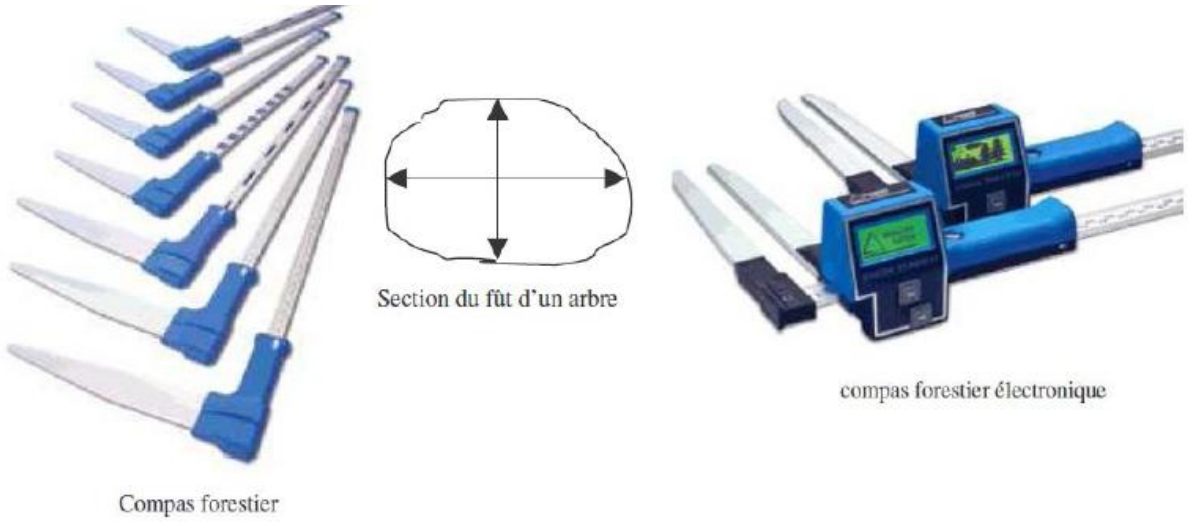


Figure I.4 : Compas forestier

I.2.5 Mesure de la circonférence

La mesure de la circonférence s'opère généralement à l'aide d'un ruban, si possible indéformable, à trame métallique ou mieux en fibre de verre. Ce ruban (de 1,5 m ou de 3 m) permet la mesure à tous niveaux ; la mesure à hauteur d'homme étant considérée à 1,3 m (1,5 m dans certains pays). En ce qui concerne la mesure de circonférence à divers niveaux d'arbres abattus, plus spécialement situés sur parterres de coupes, l'utilisation du ruban n'est pas toujours possible, il est alors d'usage de recourir à la ficelle du marchand de bois (aiguille métallique courbe fixée à une ficelle dont on mesure la longueur ayant été nécessaire pour ceinturer l'arbre).

I.3 Erreurs

I.3.1 Instrumentales :

Les causes d'erreurs instrumentales les plus fréquentes ont trait à la qualité même du ruban, à son indépendance vis-à-vis des variations de conditions climatiques ambiantes, à la netteté et à l'exactitude des graduations.

I.3.2 Erreurs de mesure :

De même que pour le compas, on peut mettre en évidence trois types d'erreurs liées à une mauvaise manipulation du ruban :

- Erreur d'inclinaison ;
- Niveau de mesure incorrect ;
- Tension exercée sur le ruban.

I.3.3 Détermination de la surface terrière

La surface terrière (g) d'un arbre est la surface de la section transversale de cet arbre à hauteur d'homme (à 1,3 m). Supposez que l'on coupe tous les arbres du peuplement à 1,30 m du sol. La surface terrière est la somme de toutes les surfaces des sections. Elle s'exprime en mètre carré (m²). C'est une donnée abstraite pour beaucoup de gens, mais qui constitue néanmoins un outil très précieux pour juger de l'importance d'un volume sur pied et établir la nature et l'intensité des interventions à réaliser. Pour l'évaluer, l'on peut mesurer les diamètres (ou les circonférences) de tous les arbres de votre placette selon la méthode décrite ci-dessus. Puis vous calculez les sections S correspondant en sachant que :

$$g_{(1,3)} = \frac{\pi d_{(1,3)}^2}{4} = \frac{c_{(1,3)}^2}{4\pi}$$

On assimile la section à une surface circulaire. Nous verrons ultérieurement la manière de procéder pour déterminer la surface terrière à l'hectare (G) d'un peuplement.

I.3.4 Quelques cas particuliers

Il existe des conventions particulières pour mesurer la grosseur des arbres en fonction des cas de figure rencontrés sur le terrain (Figure I.5).

- **Conventions liées à la topographie**

- Mesure du côté amont de l'arbre sur terrain en pente (a).

- choix d'un niveau moyen matérialisant le point inférieur de mesure de la hauteur d'homme dans le cas d'un sol à surface très irrégulière (c).

- **Conventions liées à la morphologie des arbres**

- Mesures individuelles des tiges d'arbres fourchus si la fourche prend naissance en dessous du niveau hauteur d'homme (e, d).

- Mesure en oblique dans le cas d'arbres penchés (b).

- Résultat moyen si le défaut se trouve à hauteur d'homme (f).

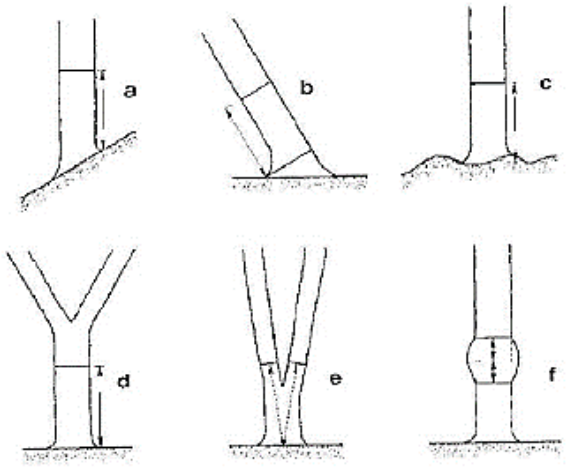


Figure I.5 : Conventions à adopter en fonction de la topographie et de la morphologie des arbres

I.4 Mesure de la hauteur des arbres

I.4.1 Définition

Après la grosseur d'un arbre, la hauteur est la caractéristique la plus importante à mesurer ou à estimer en vue de déterminer le volume ou divers paramètres de forme. Elle joue aussi un rôle essentiel dans la caractérisation de la productivité des stations forestières. Nous réserverons le terme de « hauteur » aux arbres sur pied, tandis que le terme de « longueur » concernera plutôt la mesure de la tige d'arbres abattus (ou grumes). On peut définir plusieurs types de hauteurs :

- Hauteur totale : distance verticale séparant le niveau du sol du sommet de l'arbre (bourgeon terminal).
- Hauteur « bois fort » : hauteur séparant le niveau du sol du niveau de la tige correspondant à 7 cm de diamètre ou à 22 cm de circonférence.
- Hauteur « bois d'œuvre » : distance séparant le niveau du sol de la dernière fraction utilisable de la tige correspondant le plus souvent au point d'intersection de la première grosse branche ou, idéalement, à une limitation fixée en grosseur de tige.

On parlera aussi de la hauteur à la découpe « marchande » et de la hauteur au premier défaut (Figure I.6).

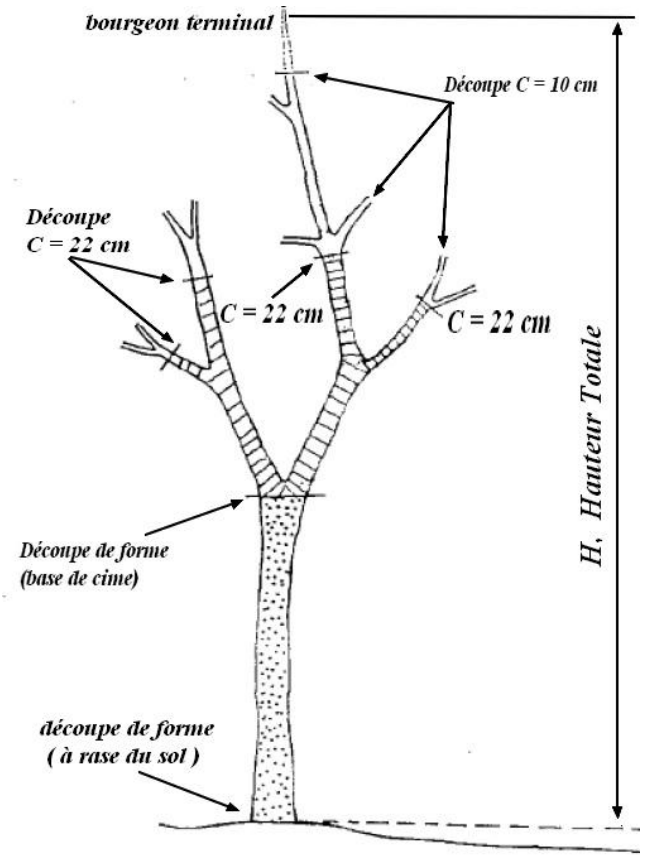


Figure I.6 : Différent type de coupes

I.4.2. Méthodes et appareils de mesure

Nous nous limiterons ici à étudier les principaux moyens de mesure de la hauteur des arbres. Nous les classerons en deux catégories :

· les procédés simples ;

· les dendromètres.

a. Procédures simples

- **Hauteur mesurée par l'intermédiaire de mesures de distances**

La croix du bûcheron

La « croix du bûcheron », très simple à utiliser, constitue une application directe des relations existant entre triangles semblables (Figure I.7). On peut mettre ce procédé en œuvre au moyen de deux baguettes d'égales longueurs, l'une tenue à hauteur des yeux et dirigée parallèlement au sol, l'autre tenue au bout de la première et verticalement ou parallèle à l'arbre.

L'opérateur se rapproche ou s'éloigne de l'arbre à mesurer de telle manière qu'il puisse apercevoir simultanément le pied de celui-ci (niveau du sol) en visant la base de la baguette verticale et son sommet en visant l'extrémité supérieure de cette même baguette. La hauteur de l'arbre correspond alors à la distance d'éloignement de l'opérateur, le plus souvent celle-ci est mesurée au pas.

En effet, d'après la figure ci-dessous :

$$\mathrm{SP} = AS + \mathrm{AP} = \frac{\mathrm{OA\ x\ BE}}{OE} + \frac{\mathrm{ECxOA}}{OE} = \frac{\mathrm{OA}}{OE}\ X\ (BE + EC)$$

D'où :

$$SP = \frac{\mathrm{OA}}{OE}\ \mathrm{x}\ BC$$

Et comme

OE = BC

Alors :

SP = OA = h

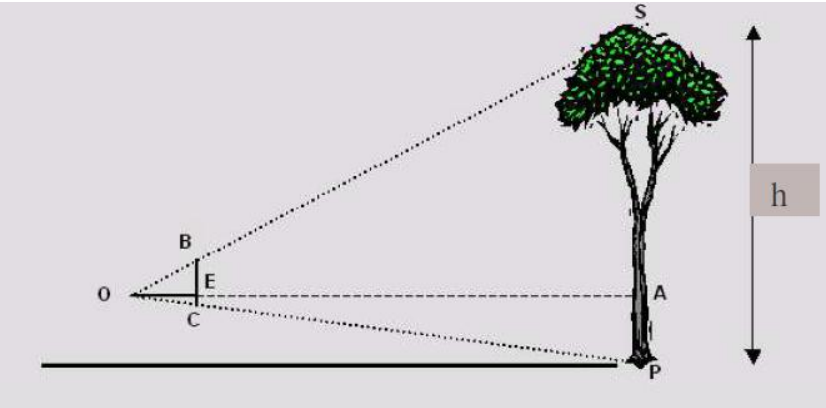


Figure I.7 : Hauteur mesurée par l'intermédiaire de mesures de distances

I.4.3. Utilisation de perches de référence

Première méthode :

Cette première méthode consiste à placer dans un premier temps une perche de référence (2 m ou 3 m par exemple) contre l'arbre à mesurer (figure I.8 ci-dessous).

Ensuite, on se met à distance et on tient verticalement devant l'un des deux yeux (l'autre œil étant maintenu fermé) un crayon (ou un autre objet) que l'on éloignera ou que l'on rapprochera de l'œil jusqu'à ce que :

- Le rayon visuel passant par l'extrémité supérieure du crayon, coïncide avec l'extrémité supérieure de la perche.
- Le rayon visuel passant par l'extrémité inférieure du crayon, coïncide avec l'extrémité inférieure de la perche.

On déplacera enfin le crayon verticalement un certain nombre de fois de manière à atteindre l'extrémité supérieure de la hauteur à mesurer.

Connaissant la hauteur h de la perche et le nombre de reports nécessaires, on peut en déduire facilement la hauteur H recherchée.

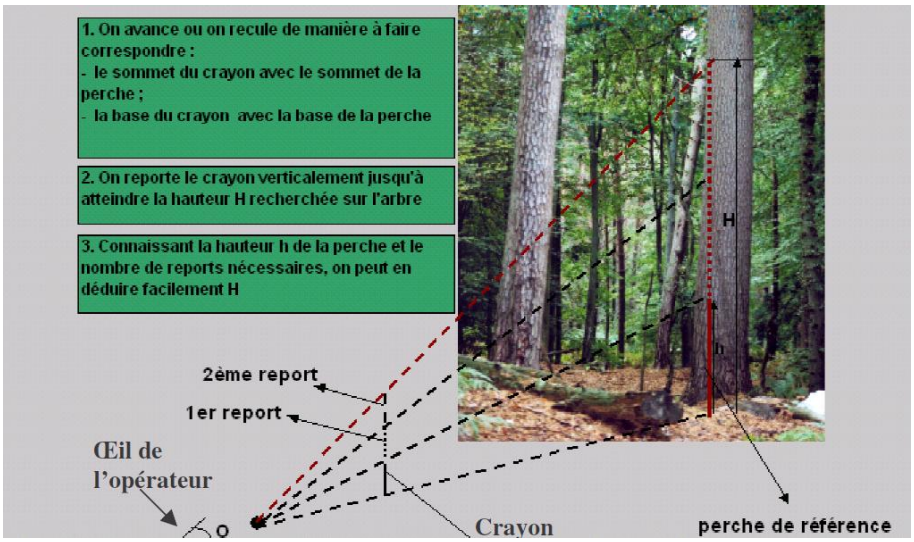


Figure I.8: Utilisation de perches de référence pour la mesure de hauteur : première méthode

- **Deuxième méthode :**

Le principe est ici encore simple. L'opérateur tient verticalement à hauteur de ses yeux une règle graduée devant l'arbre à mesurer.

En visant l'arbre (figure I.9 ci-dessous), la graduation 0 de la règle doit correspondre à la base de l'arbre. Il suffit ensuite de lire :

· la graduation correspondant à la visée du sommet de la perche (on obtiendra **à** qui sera la hauteur apparente de la perche mesurée sur la règle)

· puis de lire la graduation correspondant au niveau supérieur délimitant la hauteur **H** à mesurer sur l'arbre (on aura a+b qui sera la hauteur apparente de H).

La hauteur **H** de l'arbre sera donnée par : $H = \frac{\mathrm{h}}{a} X\ (a + b)$

Le dendromètre de Christen, peu employé de nos jours, repose sur ce principe.

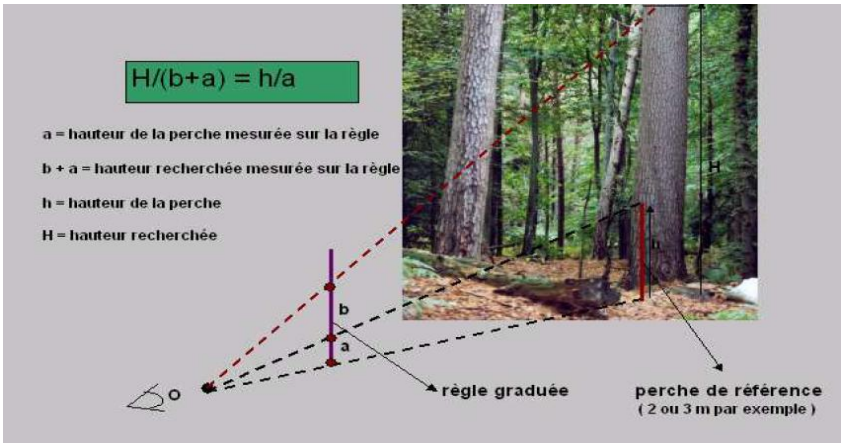


Figure I.9 : Utilisation de perches de référence pour la mesure de hauteur : deuxième méthode

Cette méthode est très intéressante pour mesurer des hauteurs de découpe peu importantes ou pour mesurer des hauteurs inférieures à 20 m.

I.5. Détermination de la forme des arbres

I.5.1 Forme théorique d'un arbre

La forme d'un arbre est un élément important intervenant dans le calcul de son volume si nous nous intéressons à la forme d'une tige, nous pouvons observer que celle-ci correspond à la juxtaposition de plusieurs solides géométriques.

En effet, selon notamment Row et Guttenber pour beaucoup d'espèces, de la base au sommet de la tige, on peut identifier en théorie successivement un tronc de néloïde, un tronc de paraboloïde, et un tronc de cône **(Jean, 2005)** (Figure I.10).

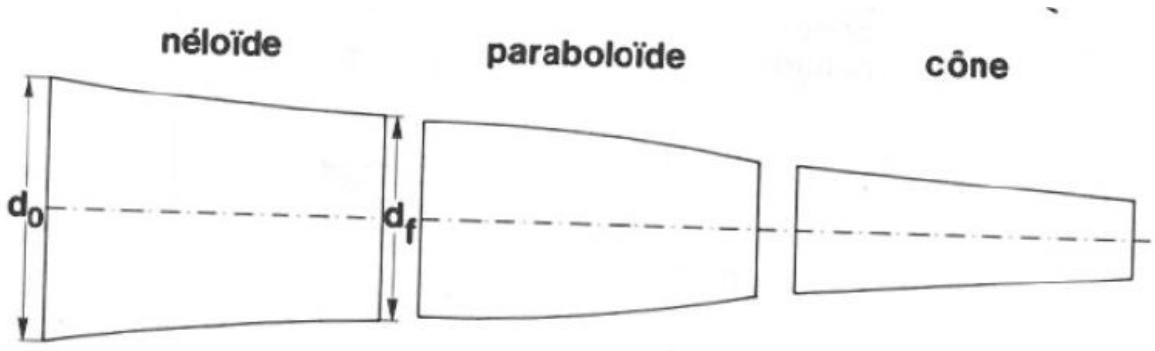


Figure I.10 : Décomposition schématique d'une tige en solides géométriques **(in Rondeux J.1993)**

En réalité, la tige des arbres est d'une forme variable, et souvent irrégulière. Elle ne peut être strictement comparée à une des formes citées ci-dessus. Il est donc difficile, sinon impossible d'en mesurer le volume avec une parfaite exactitude. C'est pourquoi dans la pratique commerciale courante, on admet très simplement que le volume du fut d'un arbre est à assimiler à celui d'un cylindre.

- **Les caractéristiques de forme des arbres**

Les expressions dendrométriques couramment utilisées pour caractériser la forme générale d'un arbre (fut) sont :

- le coefficient de décroissance (k),

- le coefficient de réduction (r),

- le défilement ou décroissance métrique moyenne (d.o.m.),

- le coefficient de forme (f).

- **Cubage des arbres**

Le cubage des arbres forestiers est une pratique fondamentale dans la gestion des ressources forestières. Il s'agit d'une méthode permettant de déterminer le volume de bois contenu dans un arbre, ce qui est essentiel pour évaluer la qualité et la quantité de la matière ligneuse présente dans une forêt. Cette information revêt une importance cruciale pour la prise de décisions éclairées en matière d'aménagement, de récolte et de conservation des ressources forestières.

Le processus de cubage peut varier en fonction de divers facteurs tels que l'espèce d'arbre, la forme du tronc, le diamètre, la hauteur, et même la région géographique. Plusieurs méthodes ont été développées pour estimer le volume de bois d'un arbre, allant des techniques manuelles traditionnelles aux méthodes plus avancées basées sur la technologie, comme la télédétection et la modélisation informatique.

Les méthodes manuelles impliquent généralement l'utilisation d'outils tels que la règle de Biltmore, la jauge de Smalian, ou encore l'abaque de Huber. Ces outils permettent aux forestiers de mesurer différents diamètres et hauteurs de l'arbre, puis d'appliquer des formules mathématiques spécifiques pour estimer son volume total. Cependant, ces méthodes peuvent être limitées en termes de précision et d'efficacité, en particulier lorsqu'il s'agit de forêts vastes et diversifiées.

Les méthodes plus modernes tirent parti de la technologie pour améliorer la précision du cubage. La photogrammétrie, la télédétection par satellite, les lasers LiDAR et les modèles informatiques en 3D sont devenus des outils précieux pour estimer les volumes de bois avec une plus grande précision. Ces méthodes non seulement considèrent les caractéristiques géométriques des arbres, mais elles peuvent également prendre en compte d'autres facteurs tels que la densité du bois, les conditions environnementales et la santé de la forêt.

En somme, le cubage des arbres forestiers est une pratique essentielle pour la gestion durable des ressources forestières. En fournissant des informations précises sur le volume de bois disponible, cette méthode permet aux professionnels de la foresterie de prendre des décisions éclairées en matière de récolte, de planification de la gestion et de préservation des écosystèmes forestiers pour les générations futures.

- **Cubage des bois abattus**

Modelés théoriques

Une grume, entière ou en partie, peut être assimilée approximativement aux diverses formes géométriques suivantes :

Le cylindre : $v=\frac{\pi.d_0^2.h}{4}$

Le paraboloïde : $v=\frac{\pi.h.(d_0^2+d_s^2)}{8}$

Le tronc de cône : $v=\frac{\pi.h.(d_0^2+d_0.d_s+d_s^2)}{12}$

Le néloïde : $v=\frac{\pi.h.(d_0^2+d_0^{2/3}.d_s^{1/3}+d_0^{1/3}.d_s^{2/3}+d_s^2)}{16}$

Où, pour le solide géométrique envisagé, h, d_0 et d_s représentent respectivement la longueur, le diamètre à la section de base, et le diamètre à la section terminale (sommet).

- **Cubage exact des grumes**

Afin de construire des tarifs de cubage, il est important d'obtenir des cubages aussi proches que possibles du volume exact de la grume mesurée.

Nous envisagerons d'abord la détermination du volume de la grume considérée comme un tout (cubage global).

Ensuite, nous aborderons le cubage par billons successifs où l'on décompose fictivement la grume en une suite de billons ; chaque billon étant cubé individuellement.

a) Cubage global :

Selon l'ensemble de la grume, on appliquera une des formules suivantes :

- **Cubage par la formule de HUBER :**

L'utilisation de cette formule empirique se base sur l'hypothèse que la tige peut être assimilée à un cylindre dont la base et la hauteur correspondent respectivement à la section médiane et à la longueur de ce tronc.

$$v=\frac{\pi.d_m^{\,2}.L}{4} \text{ ou } v=\frac{C_m^{\,2}.L}{4.\pi}$$

Avec

dm = diamètre médian de la grume
Cm = circonférence médiane de la grume
L = longueur de la grume

Cubage par la formule de SMALIAN :

La formule de SMALIAN part de l'hypothèse que l'arbre à cuber s'assimile à un tronc de paraboloïde.

$$v=\frac{\pi.L.(d_0^{\,2}+d_s^{\,2})}{8} \text{ ou } v=\frac{L.(C_0^{\,2}+C_s^{\,2})}{8.\pi}$$

Où L, d_0 et d_s représentent respectivement la longueur de la grume, le diamètre à la section de base, et le diamètre à la section terminale (sommet).

- **Cubage par la formule du tronc de cône :**

La formule du tronc de cône part de l'hypothèse que l'arbre à cuber peut-être assimiler à un tronc de cône.

$$v=\frac{\pi.L.(d_0^{\,2}+d_0.d_s+d_s^{\,2})}{12} \text{ ou } v=\frac{L.(C_0^{\,2}+C_0.C_s+C_s^{\,2})}{12.\pi}$$

- **Cubage par la formule de NEWTON :**

Cette formule est valable pour toutes les formes géométriques vues. Elle ne donne lieu à aucun biais (sous-estimation ou surestimation systématique du volume).

$$v=\frac{\pi.L.(d_0^2+4d_m^2+d_s^2)}{24} \text{ ou } v=\frac{L.(C_0^2+4C_m^2+C_s^2)}{24.\pi}$$

- **Cubage par billons successifs :**

Principe :

On décompose fictivement la grume en une suite de billons. Chacun des billons est cubé ; le cumul de ces cubes donne le volume de la grume. L'estimation étant d'autant meilleure que les billons sont plus courts.

- Utilisation des formules de cubage :

Le principe de cubage par billons successifs peut être envisagé par utilisation de l'une ou l'autre des formules de cubage vues précédemment. Soit un arbre de longueur h décomposé en n billons de même longueur L ; de diamètre médian di, de surface médiane Si et de volume vi. Si l'on applique la formule de HUBER à chacun des billons, le volume total correspond à :

$$v=\frac{\pi.L}{4}(d_1^2+d_2^2+....+d_n^2)=\frac{\pi.L}{4}\sum_{i=1}^{n}d_i^2$$

Ce qui revient donc à :

$$v=(v_1+v_2+...+v_n)=\sum_{i=1}^{n}v_i$$

Influence de la formule de cubage et de la longueur des billons :

(Palm, 1982) fait observer que l'assimilation de la forme des billons à des troncs de cône est la plus raisonnable, elle est la moins tributaire de la longueur des billons et paraît beaucoup mieux s'adapter à la forme générale d'un arbre qui s'apparente davantage à une succession de troncs de cône.

Il recommande la réalisation de mesures de 50 en 50 cm sur les deux premiers mètres pour mieux maîtriser la base, source d'erreurs systématiques non négligeables, puis de mettre en mètre jusqu'à 10 m et de 2 en 2 m au-delà. On peut penser que ce protocole est applicable au cubage des arbres feuillus en général.

Par contre, dans la perspective du cubage de résineux, dont la forme est plus régulière,

On peut raisonnablement proposer d'espacer les mesures de 2 en 2 m dès 5 mètres de hauteur et d'augmenter l'intervalle entre mesures successives au-delà de 20 mètres.

(Rondeux, 1993) présente un exemple d'utilisation des diverses méthodes de cubage proposées jusqu'ici. Il s'agit de l'application de ces méthodes au cubage d'un douglas abattu. Il en conclu que par rapport au volume de référence (soit celui obtenu par la formule de SIMPSON appliquée à tous les billons), les différentes méthodes se classent comme suit d'après l'importance des écarts obtenus, allant des moins élevés aux plus élevés :

Cubage par :

- Tous les billons : HUBER, tronc de cône, SMALIAN ;
- Billons de 3 m : HUBER, tronc de cône, SMALIAN ;
- Billons de 6 m : HUBER, tronc de cône, SMALIAN ;
- Tige entière (cubage global) : tronc de cône, HUBER, SMALIAN

Le cubage des arbres en grumes consiste en l'estimation du volume sur ou sous écorce, après ébranchage et recoupe de la flèche. La norme française N.F. B. 53-020 (A.F.N.O.R.) a adopté comme formule unique :

$$V = \frac{\pi d_m^{\,2}}{4} \times L$$

Où : L = longueur de la pièce ;

Dm = diamètre médian.

Soit la formule de HUBER assimilant l'arbre à un cylindre. Le cubage des bois en grumes se réfère aux normes NF-EN-1309-2 (juin 2006) et N.F. B53 - 020 (juillet 1991). Nous nous limiterons ici à en relater les propos principaux. L'opération de mesurage d'une pièce de bois s'appelle le toisé ; il est effectué par la partie prenante.

Chapitre II : Présentation de la zone d'étude

Le choix de cette zone d'étude repose principalement sur la disponibilité de données brutes acquises par LiDAR terrestre (TLS), indispensables à la réalisation des traitements et analyses prévus dans le cadre de ce travail. Ces données, caractérisées par leur précision et leur richesse en informations tridimensionnelles, permettent une représentation détaillée de la structure des arbres et des peuplements forestiers. Ainsi, la disponibilité de ce jeu de données a constitué un critère déterminant dans la sélection de la zone d'étude, garantissant la faisabilité des analyses et la fiabilité des résultats obtenus.

II.1. Situation géographique et présentation de la Wilaya de Ain Témouchent :

II.1.1. Sur le plan administratif

Ain Témouchent, est une Wilaya du Nord-Ouest de l'Algérie, située à 520 km de la capitale Alger, avec une superficie de 2.376,89 Km^2 et une façade maritime de 80 Km. Elle compte à une population de 426.762 habitants avec une densité de 180 hab/Km^2 (2018). Sa position géostratégique lui permet de jouer un rôle très important dans l'économie du pays en matière d'investissement, du tourisme et d'agriculture.

Selon **DTAAT (2018)**, la Wilaya d'Ain Témouchent est délimitée territorialement, selon la Loi N° 84/09 du 04 février 1984, comme suit (figure II.1):

- Au Nord par la mer Méditerranée ;
- A l'Ouest par la Wilaya de Tlemcen ;
- A l'Est par la Wilaya d'Oran ;
- Au Sud par la Wilaya de Sidi Bel Abbes.

Elle comprend 28 communes réparties sur 08 Daïras (tableau II.1)

Tableau II.1 : Les Daïras et les communes de la wilaya de Ain Témouchent

Daïras	Communes
Ain Témouchent	Ain Témouchent – Sidi Ben Adda
El Malah	El Malah – Terga – Chaabat Leham -Ouled Kihal
El Amria	El Amria – Bouzedjar – M'said– Ouled Boudjemaa – Hassi El Ghella

Hammam Bou Hadjar	Hammam Bou Hadjar- Ouled Berkeche- Hassasna- Chentouf
Ain Larbaa	Ain Larbaa- Tamazoura- Oued Sebbah- Sidi Boumediene
Beni Saf	Beni Saf- Sidi Safi- Emir Abdelkader
Oulhaca Gheraba	Oulhaca- Sidi Ouriache
Ain Kihal	Ain Kihal- Aghlal- Ain Tolba- Aoubellil

Source : DTAAT (2018)



Figure II.1 : Répartition du Territoire de la Wilaya d'Ain Temouchent **(D.E, 2015)**

II.1.2. Sur le plan régional

La wilaya d'Aïn Témouchent occupe une position intermédiaire au sein de l'Ouest algérien, entre les grands pôles régionaux d'Oran à l'Est et de Tlemcen à l'Ouest.

II.1.3. Sur le plan physique

Selon **Amraoui, Houmadi et Sidi Mohammed (2022),** la wilaya d'Aïn Témouchent appartient au Tell occidental algérien et se caractérise par une diversité de formes de relief comprenant des plaines, des collines, des plateaux et une façade maritime méditerranéenne. Son territoire

présente des altitudes généralement modérées et bénéficie d'un climat méditerranéen marqué par des étés chauds et secs ainsi que des hivers doux et humides. Ces conditions naturelles favorisent le développement des activités agricoles et des formations végétales méditerranéennes.

II.2. Description de la Bande littoral de la Wilaya de Ain Temouchent :

Selon la **DTAAT (2018)** le relief de la Wilaya d'Ain Témouchent s'individualise en 03 unités morphologiques définies dans le cadre du plan d'aménagement de la Wilaya (2018) à savoir :

- **Les plaines intérieures :** Regroupent 08 communes et habitées par 51% de la population totale. Elles couvrent :

La plaine d'Ain Témouchent - El Amria (constituée de plaines et coteaux) ; la plaine de M'leta, se situant entre la Sebkha d'Oran et le versant septentrional de Tessala.

- **La bande littorale :** Regroupe 08 communes (24 % de la population totale) et fait partie de la chaîne tellienne :

Massif côtier de Beni Saf, le plateau d'Ouled Boudjemaa ainsi que la Baie de Bouzedjar.

- **Zone de montagne :** Elle regroupe 12 communes, soit 25 % de la population totale :

Les Traras orientaux qui se caractérisent par un relief très abrupt, les hautes collines des Berkeches, qui se prolongent jusqu'aux Monts de Sebaa Chioukh, ainsi que les monts de Tessala d'une altitude moyenne de 600m, où le point culminant atteint 923m à Djbel Bouhaneche.

II.3. Description du milieu physique de la bande littorale de la Wilaya de Ain Temouchent :

II.3.1. Topo-morphologie :

Selon **Amraoui, Houmadi et Aissa Mamoune (2022)**, la wilaya d'Aïn Témouchent présente une topo-morphologie diversifiée caractérisée par une succession de plaines, de plateaux et de reliefs collinaires. Le relief est généralement peu accidenté et s'étage entre 200 m et 300 m d'altitude, avec des pentes faibles à modérées orientées globalement du sud vers le nord. Toutefois, certaines zones présentent des versants plus marqués, notamment à proximité des

vallées et des cours d'eau, où les pentes peuvent devenir relativement importantes. Cette organisation du relief influence directement la répartition des sols, le drainage des eaux de surface et l'occupation du territoire.

II.3.2. Occupation du sol :

Selon **Zaabar et al (2022),** l'occupation du sol de la bande littorale d'Aïn Témouchent est caractérisée par plusieurs classes d'occupation du sol. Les principales catégories identifiées sont : les terres cultivées, les forêts, les terres non cultivées, les zones bâties, les routes, les serres agricoles, les terrains nus ainsi que les surfaces en eau. Les résultats obtenus par les mêmes auteurs (**Zaabar et al., 2022**), à partir des images satellitaires à haute résolution, montrent une prédominance des espaces agricoles, accompagnés de formations forestières et de zones urbaines réparties le long du littoral. Cette diversité de l'occupation du sol reflète l'importance des activités agricoles, forestières et urbaines dans l'organisation spatiale de la région côtière d'Aïn Témouchent.

II.3.3. Caractérisation générale des formations forestières :

- **Superficie Forestière :**

Les terres forestières occupent une superficie de 30,150 ha répartie au Nord par les massifs côtiers de Béni Saf, de Sassel et Bouzedjar, au Sud par les monts du Tessala.

Les formations forestières de la wilaya sont composées de :

Forêts de pin d'Alep et d'eucalyptus en peuplement artificiel issus du reboisement.

Maquis arboré à base de thuya, genévrier de phoenicie, chêne kermes et lentisque.

De terres nues en stade de dégradation à base de palmier nain.

A) Forêts et reboisement : 7,763 ha.

B) Maquis et terrains nues : 22,387 ha.

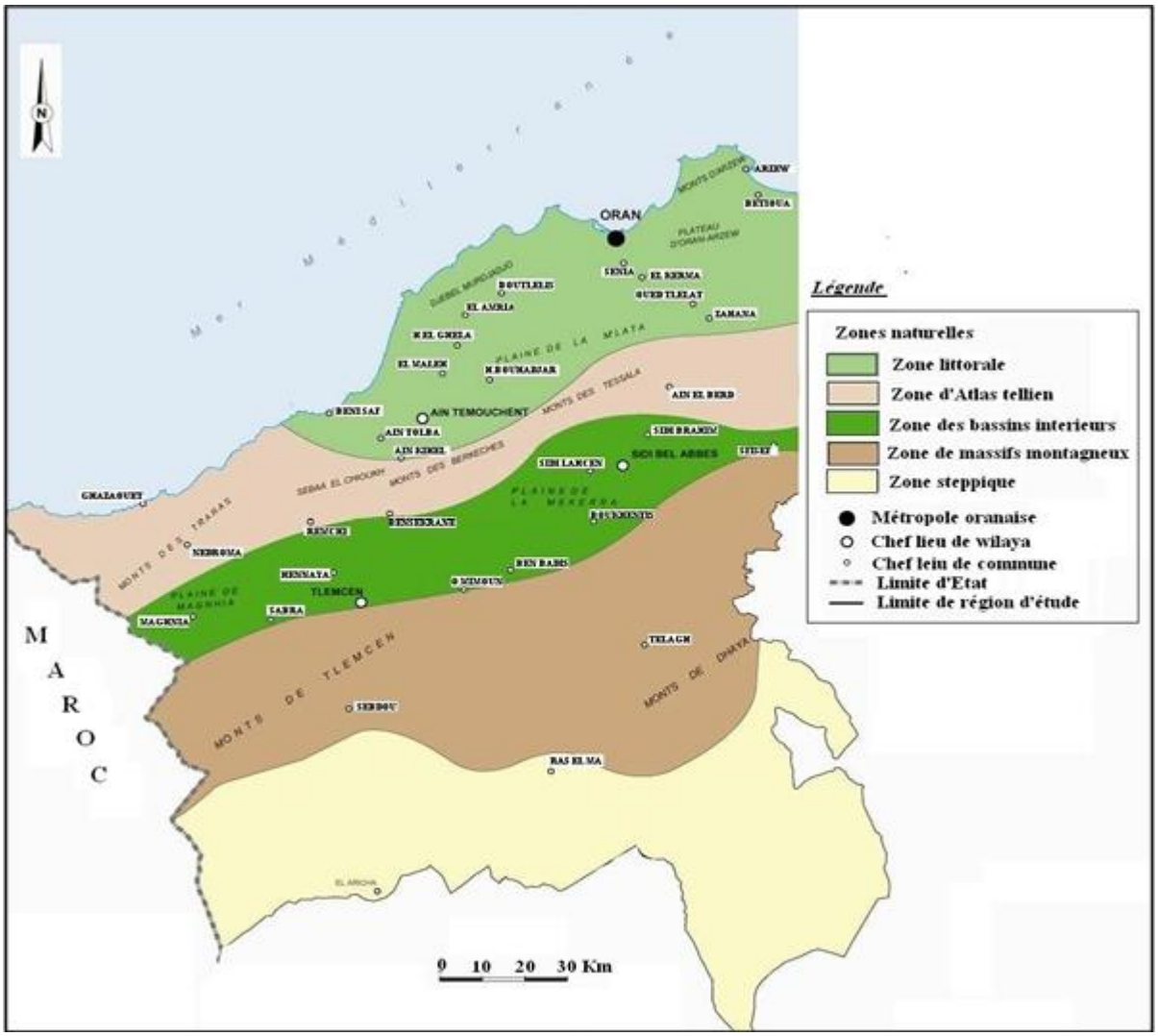


Figure II.2 : Superficie forestière de la wilaya d'Ain Temouchent **(D.E, 2015)**

II.3.4. Pédologie :

L'étude des sols en Afrique du Nord ont fait l'objet de nombreux travaux de La cartographie recherche pionniers. Parmi les contributions majeures, nous pouvons citer les investigations menées successivement par **Gaucher (1947)**, **Durant (1958)**, **Dresch (1960)**, **Simonneau (1961), Alcaraz (1982)** et **Halitim (1985)**. Grâce aux interprétations pédogénétiques fournies par ces différents auteurs, les sols de cette région méditerranéenne ont pu être rattachés à deux grandes catégories principales : les sols rouges fersiallitiques (communément appelés « terra rossa ») et les sols carbonatés à croûte.

II.3.5. Géologie :

Le monde méditerranéen représente un véritable puzzle, tant par son modèle Fragmenté et hétérogène à l'extrême que par sa géologie, qui est certainement l'une des plus complexe au monde **(Quézel et Médail, 2003)**

La géologie est à la fois la description des masses minérales qui compose l'écorce terrestre (Lithosphère) et la reconstitution de leur histoire **(Barruol, 1984)**.

La région de Béni Saf, le substratum géologique est constitué par des schistes primaires et des calcaires jurassiques au niveau de la chaîne de Skhouna qui se trouve au Sud de l'agglomération de Béni Saf. Par ailleurs, la vallée de la Tafna constitue la zone agricole la plus fertile de la région en raison de la présence de roches volcaniques (Basaltes) qui permettent la constitution d'un excellent sol poreux, qui a le pouvoir d'emmagasiner une grande quantité d'eau **(A.N.A.T, 1994)**

- **Classification des terres en fonction des potentialités**

Les informations sur la classification des terres ont été inspirées à partir de la carte des potentialités des terres (figure II.3), réalisée par **(A.N.A.T, 1994)**, après avoir été reproduite et développée par le SIG.

- **Terres agricoles à haute potentialité**

Dans la région de Béni saf, nous avons les sols de la basse vallée de la Tafna. Ils sont formés de sols peu évolués d'apport alluvial, de bonne profondeur Supérieure à 80 cm, de texture fine à moyenne, la topographie est plane. Ces terres représentent une superficie de 265,9 ha, soit 4,3 % de la surface total de la commune et sont généralement occupées par les agrumes et les cultures Maraîchères (figure II.3).

- **Terres agricoles à bonne potentialité**

Ces sols sont localisés dans la partie Ouest de la commune de Béni Saf (El Bradj). Ces sols sont des formations Marno-gréseuses et volcaniques, de profondeur bonne à moyenne (60 à 80cm), avec une topographie inférieure à 3%. Ce type de terres représente 765,8 Ha, soit les 12,4% de la surface totale, il est occupé par la céréaliculture et les vergers.

- **Terres agricoles à moyenne potentialité**

Ces sols sont répartis un peu partout à travers la commune, il s'agit des sols riches en fer (dioxyde de fer), peu profonds (30 à 50cm), avec une présence de croûte calcaire à faible

profondeur (30cm) et une topographie marquée par de légères ondulations (pente varie entre 3 à 12%). Ces terres représentent 35%, soit 2155,1Ha et sont occupées par la céréaliculture.

- **Terres à faible potentialité**

Ici nous sommes en présence de terres occupées par les formations végétales (forêts, matorral, broussailles). Elles représentent les 40% des terres soit 2431 Ha, localisées sur le massif de Béni Saf, à pente prononcée (25%), ces sols squelettiques sont fortement érodés

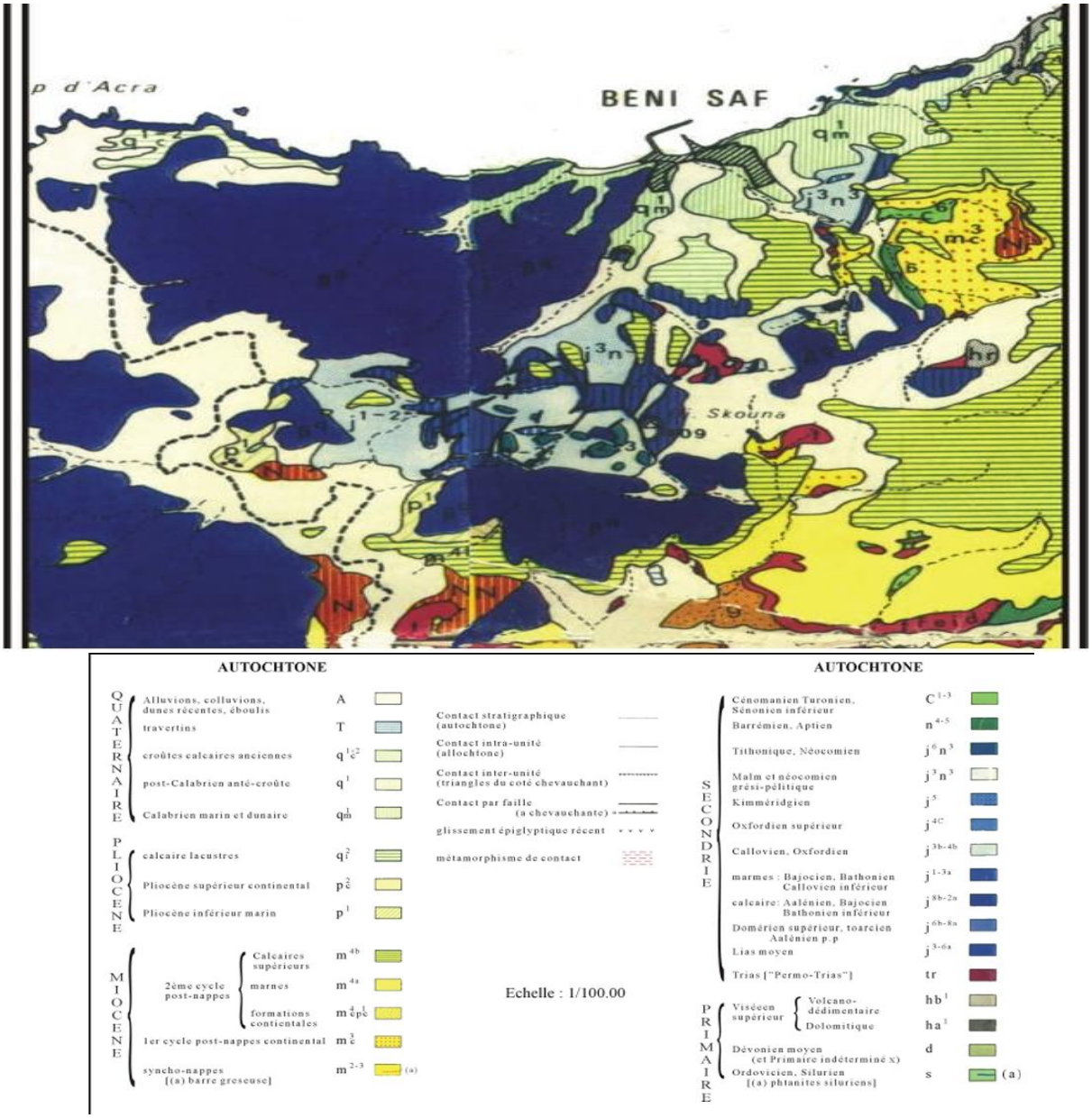


Figure II.3: Carte géologique de la zone de Béni-Saf (**Gardia,1975 in Sari (2004))**

II.3.6 Relief :

La région Nord-ouest d'Algérie présente une diversité de reliefs, c'est un relief accidenté notamment au niveau des espaces montagneux avec des pentes fortes dépassant les 6° favorisant le ruissellement des eaux pluviales, présentant, de ce fait, des couloirs (vallées, bassins, etc.), l'existence de plusieurs plaines avec de grandes potentialités agro pédologiques, ces plaines littorales et d'intérieurs, dont la pente est faible, présente un siège d'alimentation des eaux souterraines. Ces principaux éléments topographiques constituent le système hydrologique de ces ensembles naturels **(Bentekhici, 2018)**.

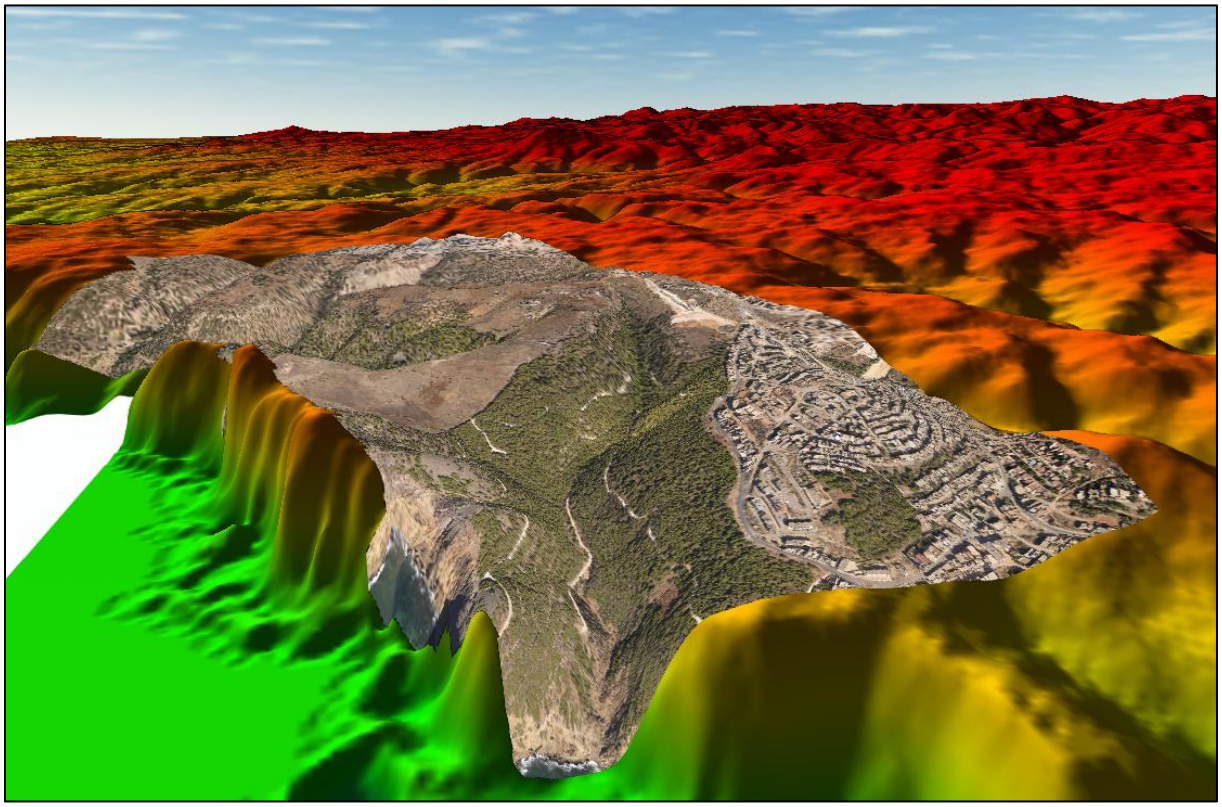


Figure II.4 : Carte du relief de la zone de beni saf

La ville de Beni Saf est située dans la bande littorale de la wilaya de Ain Temouchent.

La forêt domaniale de Fontaghera est située au Nord-Est de la ville de Beni Saf (wilaya d'Aïn Témouchent). Elle s'étend sur une superficie de 76,81 ha (figure II.5), est principalement composée de pins d'Alep. Cette forêt, qui présente une grande importance socioéconomique et écologique, est issue d'un reboisement de Pin d'Alep effectué vers 1973.

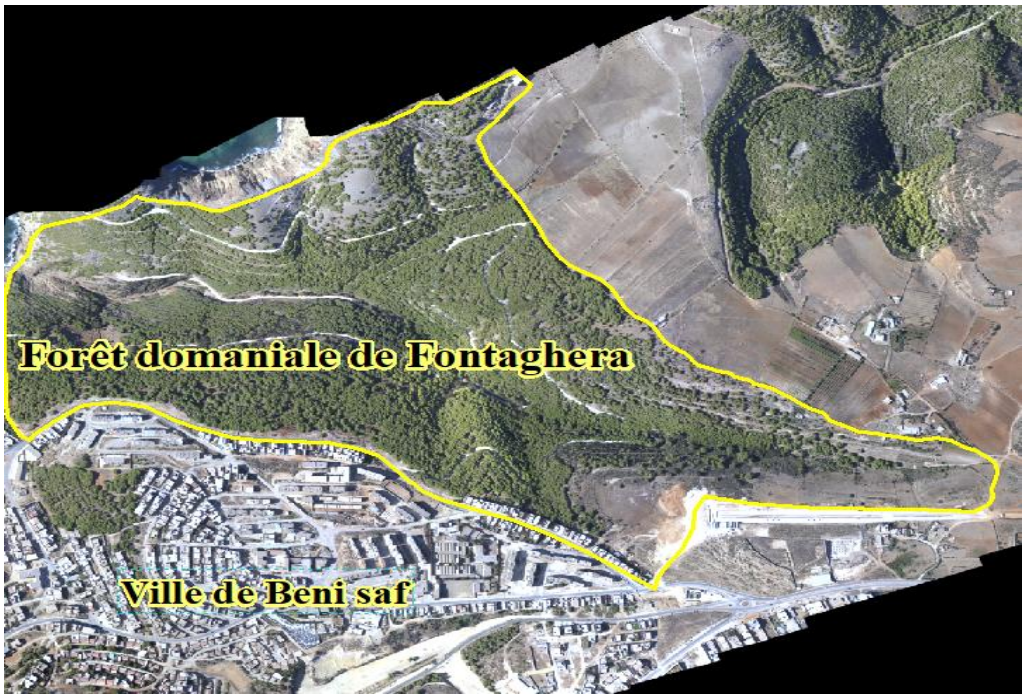


Figure. II.5 : Localisation de la forêt domaniale de Fontaghera.

II.3.7 Hydrologie :

Notre zone d'étude et caractérisé par deux principaux réseaux hydriques (figure II.6) :

- **Le réseau hydrographique temporaire** : ce type de réseau est dense et sec pendant l'été, son intensité augmente en fonction du temps. C'est un agent direct d'érosion. Les deux cours, les plus importants de ce réseau, se détachent, le premier Oued El Attech, au sud du massif, prend une direction Est-Ouest pour rejoindre la Tafna dont il est un confluent et le second Oued Chaabat Dalia, est une branche de l'Oued Sidi Djeloul, à l'Est de la commune.
- **Le réseau hydrographique permane :** ce type de réseau ne s'assèche pas durant la saison estivale. Il est présenté dans la région par le seul cours d'eau important, qui prend naissance dans les monts de Tlemcen, à partir des sources d'Ain Taga et Ghar Boumaaza, leur cours d'eau parcourt 177 km et se jette à la plage de Rechgoun.

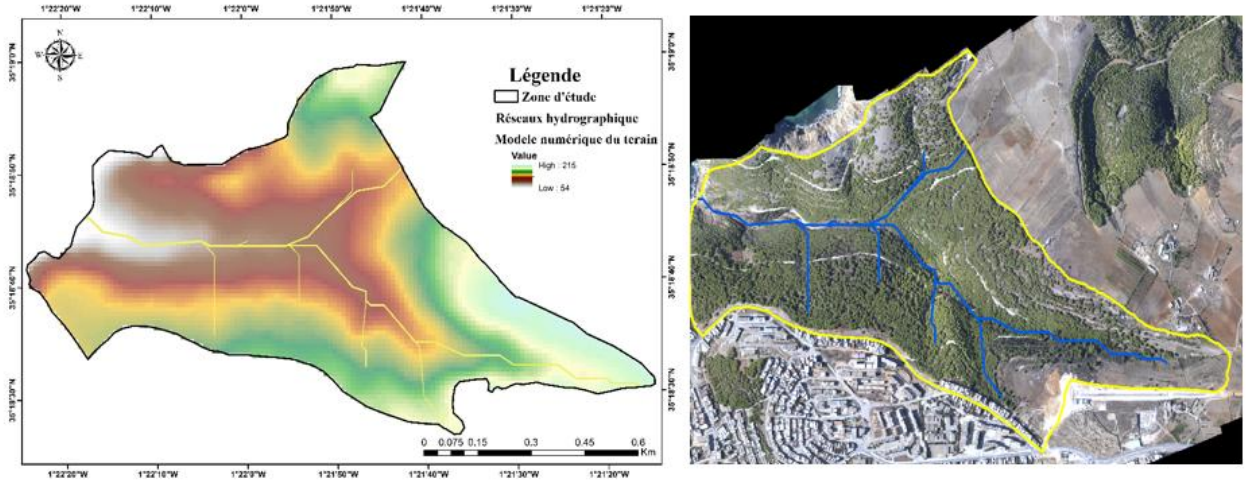


Figure II.6 : Carte du réseau hydrographique de la zone d'étude

II.4 Importance forestière de la zone d'étude

La forêt domaniale de Fontaghera est dominée par le Pin d'Alep en stade perchis, avec la présence des quelques sujets d'Eucalyptus et Cyprès (photo II.1).



Photo II.1 : Forêt domaniale de Fantaghera

II.4.1 Exposition

Pour la Forêt domaniale de Fantaghera, quatre expositions de versants (figure II.7) ont été différenciées (effets importants sur le microclimat) :

- **Exposition Nord :** qui domine la forêt de Fantaghera par 34,395 ha (44,77%) ;
- **Exposition Sud :** avec 22,796 ha (29,67%) ;
- **Exposition Ouest :** environ 17,789 ha (23,15%) ;
- **Exposition Est :** reste négligeable avec 01,828 ha (2,37).

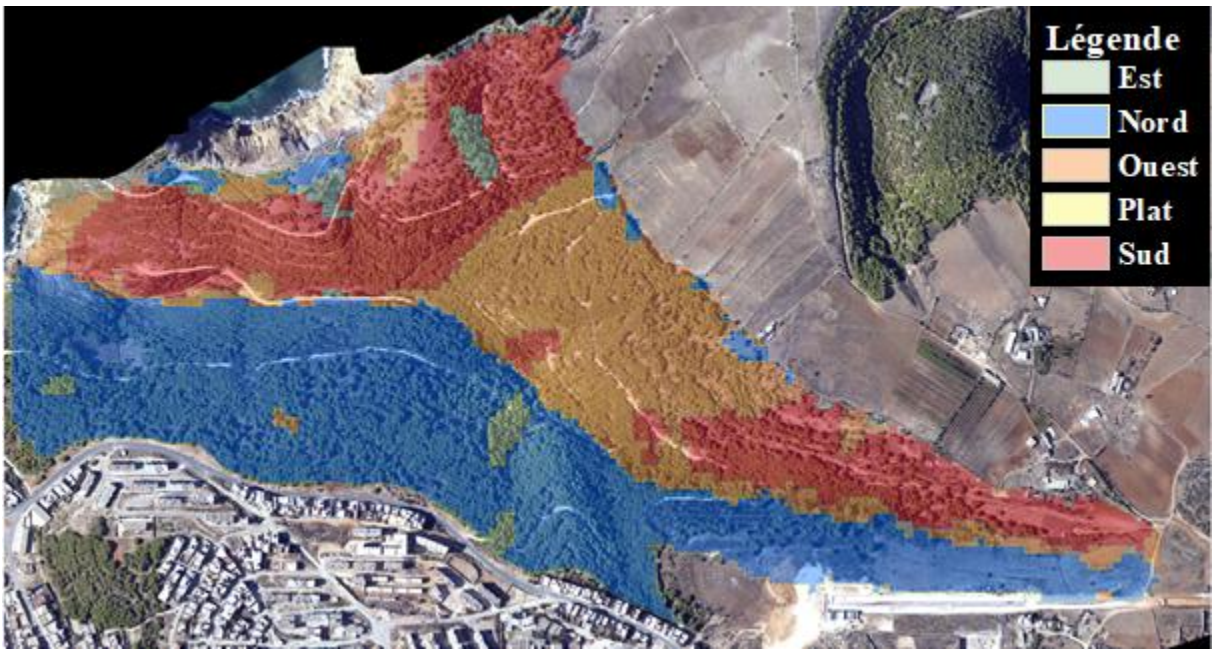


Figure II.7 : Expositions des versants de la forêt domaniale de Fantaghera.

II.4.2. Pente

La pente constitue un facteur topographique majeur influençant la structure et la dynamique des écosystèmes forestiers. Elle agit directement sur la stabilité des arbres, le développement du système racinaire, la disponibilité en eau et en éléments nutritifs, ainsi que sur les processus d'érosion et de ruissellement. Dans les zones à forte pente, les arbres sont généralement soumis à des contraintes mécaniques plus importantes, ce qui peut affecter leur croissance, leur architecture et leur répartition spatiale. En outre, la pente influence les opérations d'inventaire forestier et les acquisitions par LiDAR terrestre (TLS), en modifiant les conditions de visibilité, les phénomènes d'occlusion et la précision des mesures. Par conséquent, la prise en compte de la pente est essentielle pour garantir une estimation fiable des paramètres dendrométriques, de la biomasse et du volume des arbres. (Figure II.8).

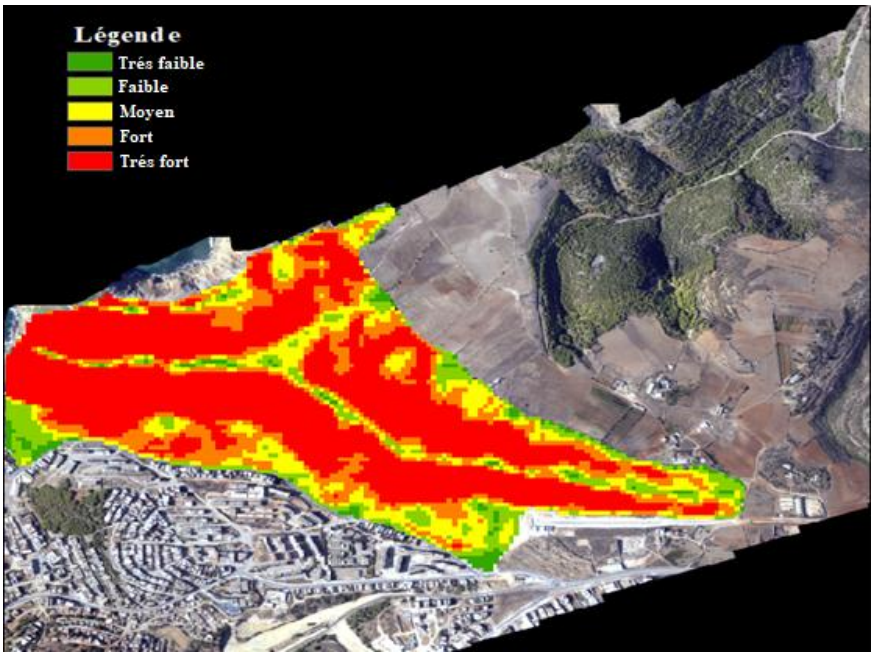


Figure II.8 : Classes de pentes de la forêt domaniale de Fantaghera

II.4.3 Le réseau routier :

La région de Beni Saf présente une infrastructure routière diversifiée repartie sur son territoire notamment : routes nationales, chemins de wilaya, chemins communaux et ruraux (figure II.9) Il existe en outre deux routes nationales, qui relient la ville de Béni Saf avec d'autres agglomérations et villes. L'une à l'Ouest RN°22 qui communique avec la RN°35 au Sud de la commune, pour rejoindre les villes du Sud, Tlemcen et Maghnia et au Nord les villes de Ain Temouchent et d'Oran. Au Nord Est, la RN°96 relie Béni Saf avec la ville de Ain Temouchent, et traverse plusieurs agglomérations à l'Est. Le total de ce type de réseau dans la commune est estimé à 11Km **(D.P.S.B, 2011).**

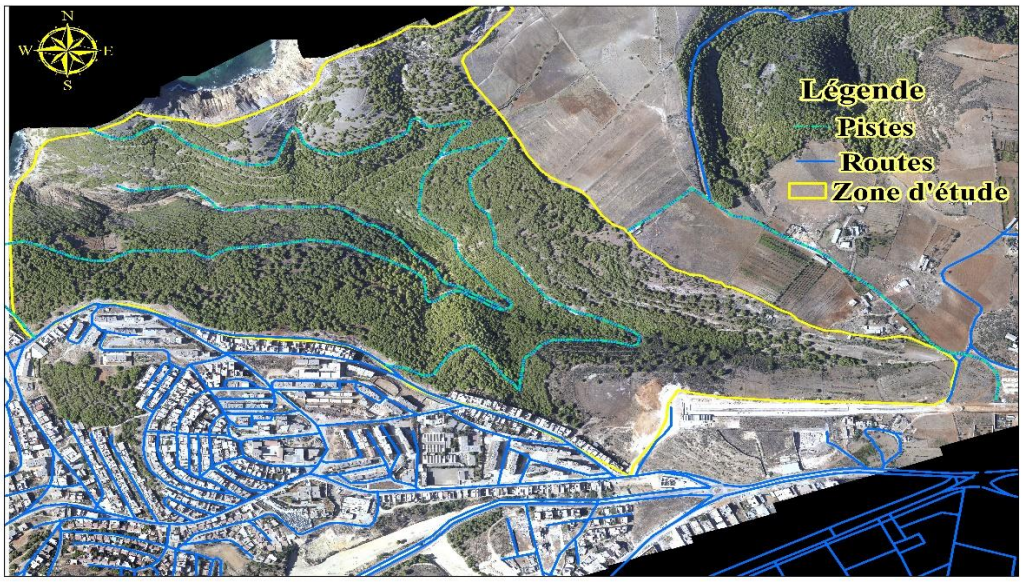


Figure II.9 : Carte du réseux routier de la commune de Beni saf

II.5 Synthèse bioclimatique

Le climat se définit comme l'ensemble des phénomènes (pression, température, humidité, précipitations, ensoleillement, vent, etc.), qui caractérisent l'état moyen de l'atmosphère et de son évolution en un lieu donné **(Sighomnou, 2004).**

Le climat de la région de Béni Saf (Nord de Ain Témouchent) comme tout le climat de l'Ouest algérien relève du régime méditerranéen à deux saisons bien déterminées, celle des pluies en saison froide et celle de la sécheresse en saison chaude de l'année. Ainsi ce type de climat est caractérisé par l'irrégularité des précipitations durant le mois et l'année. Ceci influé sur la physionomie et la régénération des peuplements végétaux naturels et aussi les succès des repeuplements et les reboisements dans la région.

La caractéristique première de l'écosystème méditerranéen est climatique. Le climat méditerranéen est défini par un été sec et chaud et une période pluvieuse correspondant aux saisons relativement froides allant de l'automne au printemps **(Aidoud, 1997)**.

D'une manière générale d'après (**Seltzer, 1946)**, le climat du l'Ouest algérien ce qu'on appelle l'Oranie en particulier, la région de Béni Saf est influencée d'une part par la chaîne de montagne du Sud de l'Espagne qui vide le grand courant Nord-Ouest, chargé d'humidité et d'autre part de l'atlas Marocain (Rif) qui éloigne les vents humides qui proviennent de l'Atlantique. Ceci limite les précipitations dans cette partie du pays, ce qui en fait une zone plus sèche sur une période presque de 8mois de l'année avec une végétation plus ou moins dense (matorral et broussailles).

D'après **(Quézel, 2000)**, le climat méditerranéen est de toute évidence un facteur important d'instabilité pour les formations végétales. Son action directe apparaît surtout par l'existence des conditions climatiques marginales. Une sécheresse estivale particulièrement importante peut aussi perturber les phénomènes de régénération en bioclimat aride et semi-aride, alors que l'abaissement accidentel des températures minimales hivernales provoque des modifications notables dans la répartition de certaines espèces (Olivier ou Pin d'Alep par exemple), mais c'est aussi indirectement que le climat méditerranéen réagit sur la végétation.

Selon **(Di Castri et al., 1990)** le rythme des précipitations et les orages brutaux et cataclysmiques jouent ici un rôle majeur, en accélérant les processus d'érosion au niveau des sols **(Quézel, 2000).**

Le climat méditerranéen est un climat de transition entre la zone tempérée et la zone tropicale avec un été très chaud et très sec, tempéré seulement en bordure de la mer, l'hiver est très frais et plus humide. Ce climat est qualifié de xérothermique **(Benabadji & Bouazza, 2000).**

Le climat général de cette région est de type méditerranéen, défini au niveau de l'étage bioclimatique semi-aride supérieur à hivers chaud les précipitations sont rares et responsables de la tendance vers l'aridité.

Pour mieux caractériser notre zone d'étude au plan climatique, nous avons retenu les données de deux périodes, l'une ancienne 1980 à 2004 et la période récente est de 2005-2015(Tableau II.2)

Tableau II.2 : station météorologique de Béni Saf

Station	Longitude Ouest	Latitude Nord	Altitude	Période d'observation
Béni-Saf	01°21'W	35°18'N	68	1913-1938 1980 à 2004 2005-2015

Source : CFAT

II.5.1 Précipitations :

La pluviosité est un facteur primordial dans le conditionnement de la nature. Elle agit directement sur le sol et la végétation, elle favorise son maintien et son développement. Elle dépend toujours de l'altitude et elle est excessivement variable d'une année à l'autre. Cependant, le réseau météorologique est loin d'être satisfaisant. Ceci peut être justifié par l'existence d'un nombre faible de station météorologiques.

II.5.1.1 Répartition mensuelle moyenne des précipitations

Tableau II.3 : Précipitations moyennes mensuelles et annuelles

Mois Stations	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Précipitation annuelle moyenne(mm)
1913-1938	49,00	40,00	37,00	30,00	24,00	9,00	1,00	2,00	15,00	39,00	57,00	68,00	371,00
1980-2004	51,05	55,57	39,77	35,70	25,68	8,12	2,70	1,66	15,05	25,91	57,94	40,36	359,51
2005-2015	66,6	44	37,6	66,9	17,9	8,5	2,8	2,4	34,9	39,8	59,1	51,6	432,1

Source : O.N.M, 2016

D'après le tableau II.3, on constate que les précipitations moyennes mensuelles et annuelles sont extrêmement variables et sont concentrées généralement en saisons froides

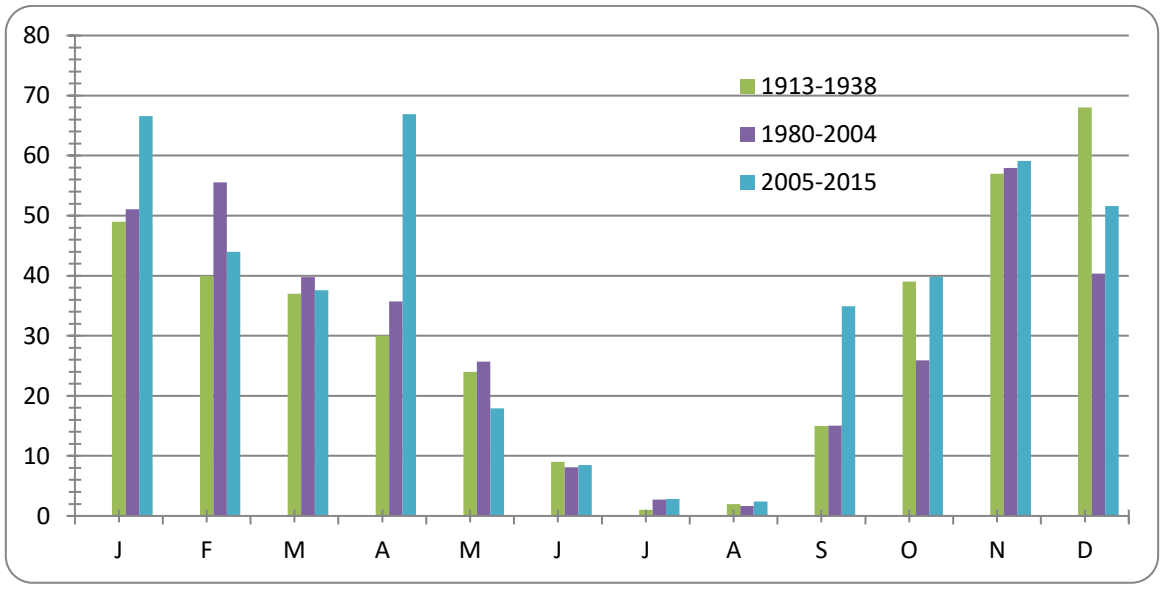


Figure II.10 : Répartition des moyennes mensuelles des pluies station Béni Saf (1913-1938) (1980-2004) et (2005-2015)

II.5.1.2. Régime saisonnier des précipitations

La distribution saisonnière des pluies diffère d'une forêt à l'autre, parfois d'une période de référence à l'autre.

Selon **(Daget, 1977),** l'été est défini sous le climat méditerranéen comme la saison la plus chaude et la moins arrosée. Ce même auteur considère les mois de juin, juillet et Août comme les mois de l'été.

Tableau II.4: Comparaison du régime saisonnier des deux périodes de Béni Saf

Station	Année	Répartition saisonnière de pluies				Type de régime
		H	P	E	A	
Béni-Saf	1913-1938	157,00	91,00	12,00	111,00	HAPE
	1980-2004	146,98	101,15	12,48	98,9	HPAE
	2005-2015	148,2	93,3	40,1	150,5	HAPE

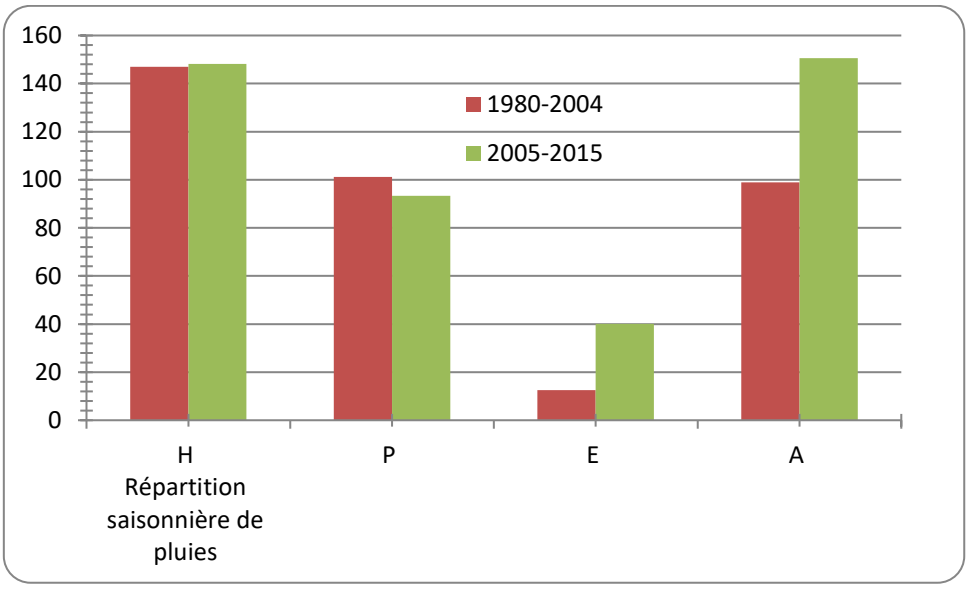


Figure II.11 : Régimes des moyennes saisonnières des précipitations de la station Béni Saf (1980-2004) et (2005-2015)

La zone d'étude est soumise à un régime saisonnier, de type HAPE pour la période (2005-2015) et HPAE pour la période (1980-2004) dans pour la station météorologique de Beni Saf. On remarque une ressemblance dans les deux régimes, qui sont caractérisés par une abondance pluviale en hiver et une sécheresse estivale. (Tableau II.4, figure II.11)

II.5.2 Température

Généralement les températures jouent un rôle écologique et physionomique très important. **(Duchauffour, 1983)**, a considéré que la température est le deuxième facteur important sur le climat. Elle est directement responsable de la répartition, de la croissance, de la reproduction des végétaux et de l'évolution des sols (pédogénèse). Dans les études de végétations, les valeurs

les plus utilisées sont : la moyenne des minima du mois le plus froid (m) et la moyenne des maximas du mois le plus chaud (M), ainsi que l'amplitude thermique. Ces données climatiques sont déjà servies par **(Emberger, 1955)** vu leur importance sur la vie biologique et biogéographique des peuplements végétaux.

II.5.2.1. Moyenne des minima du mois le plus froid « m »

Cette température est enregistrée au mois de janvier, c'est le mois le plus rigoureux de l'année. Dans la station de Béni saf, elle est de l'ordre de 8,7°C. L'examen de ce type de température dans les deux périodes, nous montre qu'il y a une petite augmentation des minima en fonction du temps. Celles-ci ont une action directe sur le comportement et le développement des végétaux. Les minima de la zone du littoral, sont plus élevés que celles de l'intérieur du pays. Dans certains endroits comme l'Atlas saharien, elles peuvent atteindre -1,8 °C **(Seltzer, 1946)**. L'effet de la mer a une grande importance sur la valeur des minima, par ailleurs les rosées et les brouillards littoraux agissent et rendent le climat plus doux.

D'après**(Aimé, 1991)**, l'importance de ces brouillards est responsable de l'augmentation des minima en période humide par la réduction du rayonnement nocturne.

II.5.2.2. Moyenne des maximas du mois le plus chaud « M »

Le tableau II.5 regroupe les différences températures maximales enregistrées dans la station de Béni-Saf pendant les 3 périodes.

Tableau II.5 : Les températures annuelles

Mois	Tna	Tnm	Tny	Moy	Tmy	Tmm	Tma
J	1,0	5,7	9,1	13,0	16,8	20,3	24,2
F	1,3	5,2	8,7	13,0	17,3	21,5	26,0
M	2,8	7,0	10,0	14,5	18,9	22,7	27,0
A	6,2	8,3	11,2	15,5	19,8	25,0	24,6
M	8,7	10,7	13,9	18,4	22,8	26,4	29,7
J	11,0	13,8	17,1	21,1	25,1	30,3	42,1
J	15,0	16,7	20,2	24,2	28,2	22,7	38,7
A	13,0	17,4	20,8	25,1	29,3	33,1	37,0
S	9,3	15,3	18,5	22,9	27,3	30,4	34,4
O	7,0	11,9	15,2	19,7	24,2	28,6	33,0
N	7,0	8,7	12,2	16,4	20,5	25,5	28,8
D	2,0	6,1	9,5	13,9	18,3	22,1	24,0

An	1,0	10,6	13,9	18,2	22,4	26,6	42,1

Source: O.N.M, (2008)

Tna : minimum absolu observé Tma : Maximum absolu observé

Tnm : moyenne brute des minima extrêmes Tmm : moyenne brute des Maxima extrêmes

Tny : moyenne de tous les minima Tmy : Moyenne de tous les Maxim

Ainsi, il est à remarquer que les mois les plus froids sont décembre et janvier de chaque année en suivant une allure graduelle décroissante, et les plus chauds, juillet et août tout en atteignant le pic de manière moins rapide. Cette distribution mensuelle des températures est d'autant valable pour les valeurs moyennes que pour les extrêmes à l'échelle annuelle, étant donné que le régime thermique sévit de manière uniforme sur l'intégralité des bassins versants. La moyenne des maximas du mois le plus chaud (M) de la région de Béni Saf est de 29,3 °C (Station Béni Saf). Ces températures coïncident avec une absence quasi totale de précipitations. La différence des maximas est de l'ordre de 2 °C, donc nous avons une augmentation dans ce type de températures.

(Aimé, 1991), précise que la brise de mer joue un rôle particulièrement important durant l'été en faisant largement baisser les températures maximales et en réduisant ainsi les amplitudes thermiques.

II.5.2.3 Températures moyennes mensuelles (T°C)

Les températures moyennes mensuelles sont consignées dans le tableauII.6 et Figure II.12.

Tableau II.6 : Températures moyennes mensuelles (Béni saf)

Mois Année	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1913-1938	12,95	13,00	14,45	15,50	18,35	21,10	24,38	25,05	22,95	19,70	16,35	13,98
1980-2004	12,75	13,92	14,89	16,20	18,75	21,95	24,44	25,36	22,51	19,98	16,55	13,97
2005-2015	12,6	13,1	14,3	16,4	18,9	21,8	24,7	25,2	22,9	19,3	15	13,4

Source : O.N.M ,2016

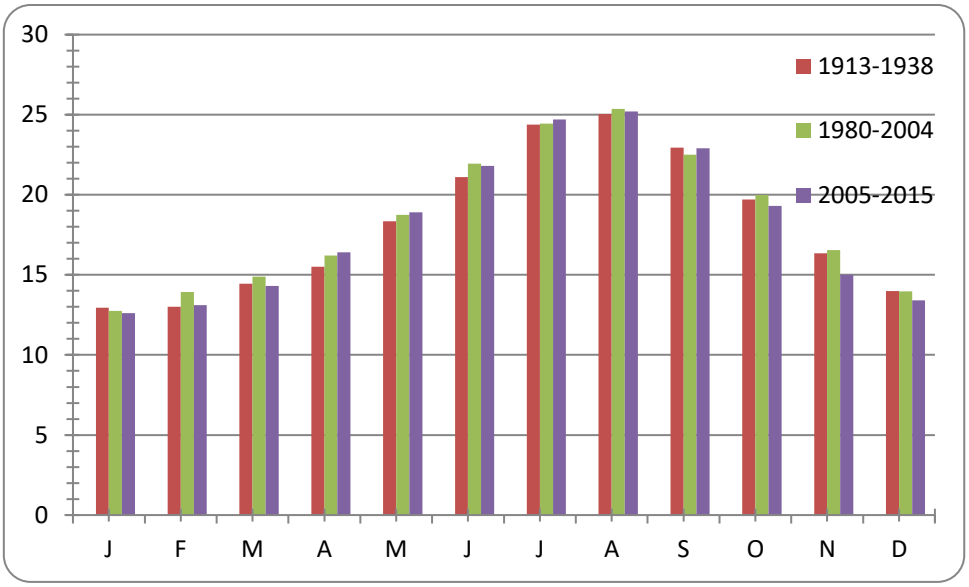


Figure II.12 : Températures moyennes mensuelles station Béni saf (1913-1938) , (1980-2004) et (2005-2015)

La synthèse des données climatiques permet de classer un climat et de mieux se rendre compte sur la répartition et le comportement des différentes associations végétales et animales. Cette synthèse fait appel à plusieurs indices, dont nous retenons particulièrement :

II.5.2.4. Amplitude thermique extrême moyenne ou indice de continentalité

Amplitude thermique, est définit par la différence entre les températures moyennes du mois le plus chaud «M » et les températures moyennes du mois le plus froid « m ».

(Debrach, 1953), propose une classification des climats fondée sur L'amplitude thermique (M-m), à savoir :

- Climat insulaire : M-m < 15°C ;
- Climat littoral : 15°C < M-m < 25°C ;
- Climat semi continental :25°C < M-m < 35°C ;
- Climat continental : 35°C < M-m.

Tenant compte de cette classification, nous avons constaté que la zone d'étude se trouve dans un climat plutôt littoral.

II.5.3. Indice de sécheresse estivale

Afin d'estimer avec précision l'intensité de la période sèche, Emberger en 1942 a représenté l'indice de sécheresse estivale par la formule suivante c :

Is=PE /M dans lequel PE désigne la pluviométrie estivale en mm et M la moyenne des maximas des mois les plus chauds en °C.

La région de Béni Saf se caractérise par une pluviométrie estivale de l'ordre de 12 mm, dans l'ancienne période (1913-1938) et 12,48 mm durant la nouvelle période (1980-2004), pour la station de Béni Saf, nous pouvons calculer l'indice de sécheresse estivale pour les périodes et qui seront comme suit :

Tableau II.7 : Indice de sécheresse des stations de référence (Is)

Périodes	**P (mm)**	**M °C**	**Is**
1913-1938	12,00	29,30	0,41
1980-2004	12,48	31,35	0,39

A partir du tableau ci-dessus, nous pouvons déduire que la sècheresse estivale devienne de plus en plus accentuée, avec un manque de précipitations durant la saison estivale, qui peut y aller jusqu'à 5 à 6 mois, une caractéristique du littoral algérien en général.

II.6. Diagramme ombrothermique de BAGNOUL et GAUSSEN

Gaussen & BAGNOULS (1953) ont défini comme mois sec, celui où la somme des précipitations moyennes exprimées en (mm) est inférieure au double de la température moyenne de ce mois (P≤2T). Ils proposent un modèle de représentation graphique où ils juxtaposent les températures et les précipitations. La sécheresse se manifeste alors lorsque la courbe des précipitations rencontre celle des températures et passes-en dessous de cette dernière.

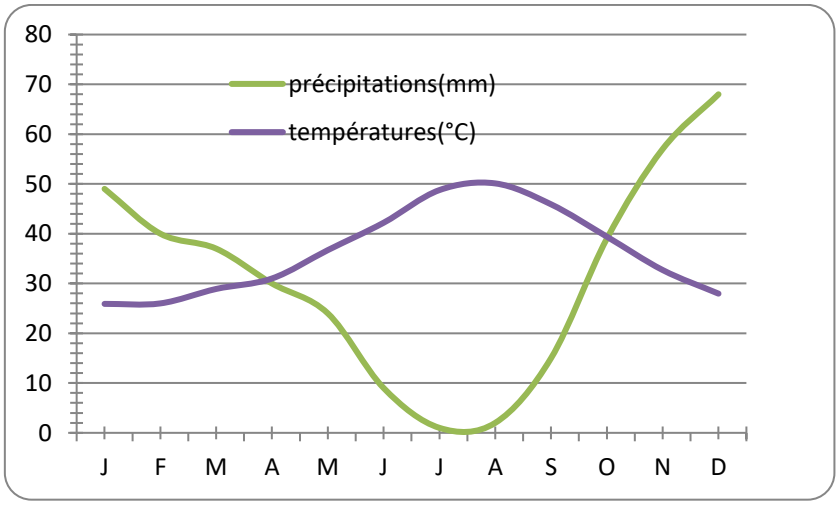


Figure II.13 : Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen (1913-1938)

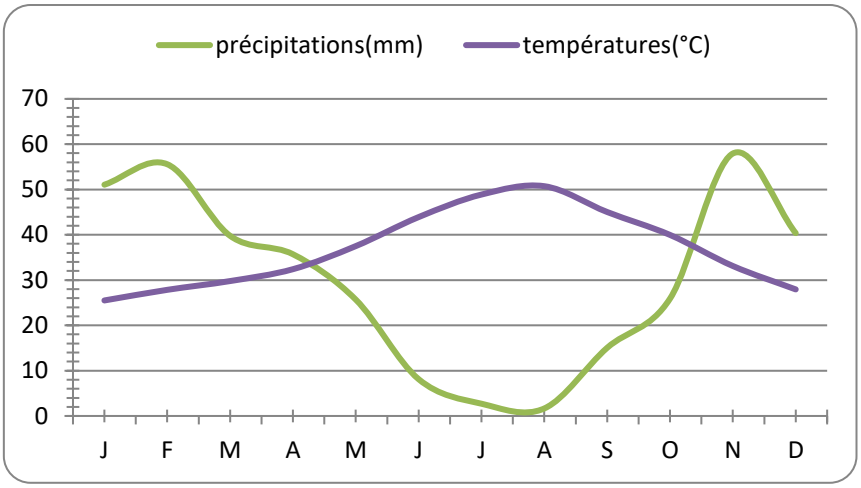


Figure II.14 : Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen (1980-2004)

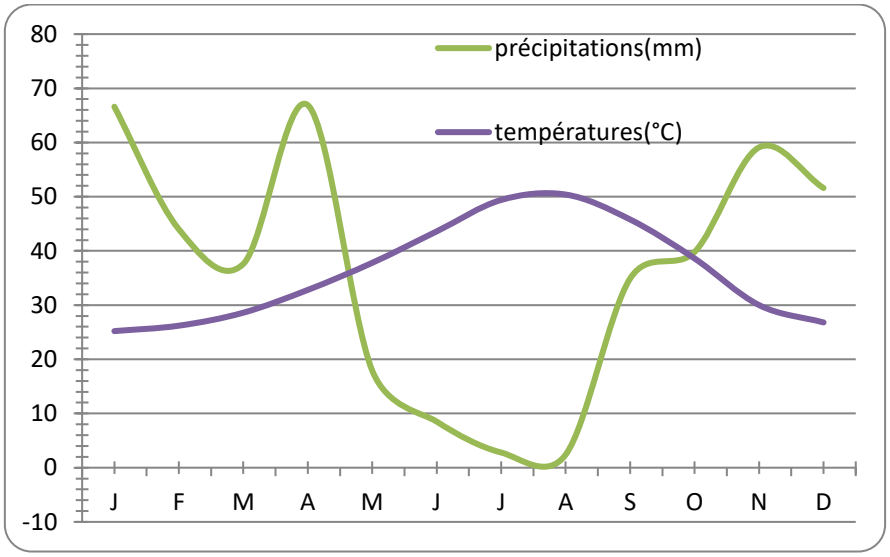


Figure II.15 : Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen (2005-2015)

Le diagramme ombrothermique de la région de Béni Saf est caractérisé par une saison sèche qui s'étend sur sept mois par an, du mois d'Avril jusqu'à Octobre dans les trois périodes (1913-1938) , (1980-2004) et (2005-2015) Les précipitations coïncident avec la période des faibles températures et les mois de juillet et Août sont les plus secs et les plus chauds dans les deux périodes (1913-1938) et (1980-2004) Le climat de la région est un climat de type méditerranéen, qui est caractérisé par la concentration des pluies durant la période froide de l'année ; il y a coïncidence de la saison sèche et de la saison chaude. L'ensemble des caractéristiques climatiques ont un lien direct avec la répartition et le développement de la végétation.

La présente étude bioclimatique a permis de mettre en exergue la variabilité climatique et son action influente sur la végétation dans la région de Beni saf, zone bien connue pour sa diversité floristique, sa biogéographie et son régime climatique méditerranéen typique. Les analyses des

données climatiques disponibles des dernières années ont permis d'identifier les manifestations de cette variabilité climatique, caractérisée par une hausse légère des températures annuelles de + 0,28°C en moyenne depuis le début des années 1913 (données de **(Seltzer, 1946)**, jusqu' à l'année 2004) et une diminution légère des précipitations (- 3 %), par rapport à la période de référence 1913-1938. A cet effet nous pouvons dire que le climat même s'il a subi quelques légères régressions (Températures et Précipitations) dans cette région, il n'a pas toute fois connue de changement significatif du moins ce qui semble ressortir de cette étude bioclimatique. (Figures II.13, II.14 et II.15)

Pour conclure, l'étude du milieu physique de la zone d'étude a permis de mieux connaître les conditions climatiques et environnementales qui influencent la forêt. Ces informations sont importantes pour bien interpréter les données qui seront obtenues par la suite.
Cette étape constitue une base essentielle pour la suite du travail, notamment pour l'analyse des données LiDAR et l'estimation des paramètres dendrométriques, voire de la biomasse forestière.

Chapitre III :

Matériel et méthodes

La levée et la consolidation des scans LiDAR terrestres constituent des étapes déterminantes dans le processus d'acquisition de données pour l'étude des peuplements forestiers. Cette démarche, lorsqu'elle est effectuée de manière méthodique et rigoureuse, offre des avantages significatifs pour la gestion forestière et la recherche écologique.

Tout d'abord, la planification initiale de la levée LiDAR est fondamentale. Elle implique une analyse minutieuse des objectifs de l'étude, la sélection appropriée des sites d'étude, et la préparation adéquate de l'équipement. En identifiant clairement les paramètres à mesurer et en choisissant des parcelles représentatives, on s'assure de collecter des données pertinentes pour répondre aux questions de recherche spécifiques.

L'acquisition des scans LiDAR terrestres nécessite une exécution précise et méthodique. En positionnant correctement les scanners et en ajustant les paramètres de collecte, on garantit une couverture complète et homogène de la parcelle. Le recouvrement des scans est essentiel pour assurer une densité de points adéquate et une représentation précise de la structure forestière.

Une fois les données collectées, le processus de consolidation commence. Cela implique le pré-traitement des scans pour éliminer les artefacts et les erreurs, ainsi que leur fusion pour créer un modèle 3D cohérent de la parcelle. Cette étape nécessite souvent l'utilisation de logiciels spécialisés et la mise en œuvre de techniques avancées de traitement des données.

Une fois consolidées, les données LiDAR terrestres peuvent être analysées pour extraire des informations précieuses sur la structure des forêts. Cela comprend la mesure de paramètres dendrométriques tels que la hauteur des arbres, le diamètre des troncs, et la densité du couvert. Ces données sont essentielles pour évaluer la santé et la vitalité des peuplements forestiers, ainsi que pour orienter les décisions de gestion.

III.1. Problématique et objectif

La levée et le traitement des données LiDAR TLS (Terrestrial Laser Scanning) sont essentiels pour calculer la biomasse des peuplements forestiers. Ces processus comprennent la collecte, le traitement et l'analyse de données spatiales et géographiques obtenues à partir de scanners LiDAR TLS. La précision élevée requise pour ces opérations nécessite des traitements rigoureux et le développement de méthodes innovantes, en raison de la complexité des milieux forestiers, marqués par la présence d'obstacles et d'effets d'ombre. Les résultats obtenus sont

utilisés pour créer des modèles 3D précis de la géométrie des arbres forestiers, permettant ainsi d'estimer le volume, la biomasse et d'autres paramètres importants des arbres.

III.2. Levée et traitements des données LiDAR terrestre

III.2.1. Le LIDAR terrestre (TLS)

Le TLS est une technologie de télédétection qui utilise des impulsions laser pour mesurer les distances et créer des nuages de points tridimensionnels. Ces nuages de points fournissent des informations détaillées sur la structure et la géométrie des objets, y compris les arbres.

Pour notre étude, les données TLS sont utilisées pour calculer la biomasse par les méthodes suivantes avec le logiciel Cloud Compare :

- **Détection des troncs d'arbres :** Les algorithmes de segmentation permettent d'identifier les troncs d'arbres dans les nuages de points ;
- **Estimation de la hauteur :** La hauteur des arbres peut être estimée en mesurant la distance verticale entre le sol et la cime de l'arbre ;
- **Estimation du diamètre :** Le diamètre des arbres peut être estimé en mesurant la largeur du tronc à une hauteur donnée ;
- **Estimation du volume :** Le volume des arbres peut être estimé en modélisant les troncs comme des cylindres ou des cônes.

Par rapport aux méthodes manuelles, l'utilisation des données TLS pour le calcul la biomasse présente plusieurs avantages :

- **Rapidité et efficacité :** Les données TLS peuvent être collectées rapidement et efficacement, couvrant de grandes surfaces en peu de temps ;
- **Précision et exactitude :** Les données TLS fournissent des mesures précises et exactes, réduisant les erreurs humaines ;
- **Informations détaillées :** Les nuages de points TLS fournissent des informations détaillées sur la structure des arbres, permettant des analyses plus approfondies ;
- **Automatisation :** Les algorithmes de traitement des données peuvent automatiser le calcul de la biomasse, réduisant le temps et les efforts.

III.3. Logiciels utilisés

III.3.1. FARO SCENE 2019.0.0.1457 : Est un logiciel propriétaire et commercial de pointe spécialement conçu pour le traitement, le recalage et la gestion des données de numérisation 3D (nuages de points) issues de scanners laser terrestres. Il permet, lors de cette étude, d'importer les données TLS recueillies dans Faro Scène. Le programme est compatible avec plusieurs formats de fichiers LiDAR. FARO SCENE 2019.0.0.1457 est une version du logiciel professionnel FARO SCENE 2019, publiée par la société FARO Technologies.

III.3.2. Computree : Est une plateforme logicielle collaborative, open-source, spécialement conçue pour le traitement et l'analyse de données de télédétection 3D (nuages de points) en contexte forestier. A partir de 2010, le département de Recherche, Développement et Innovation « RDI » de l'Office National des Forêts, l'ONF a développé Computree, initialement centrée sur le traitement des données TLS, la plateforme a été ouverte aux autres sources de données telles que le LiDAR aérien à partir de 2014.

III.3.3. Cloud compare : Est un logiciel libre et open source spécialisée dans le traitement et l'analyse des nuages de points 3D et le maillages (*meshes*), issus de différentes technologies de numérisation. Initialement développé en 2003 par Daniel Girardeau-Montaut, il est devenu un projet indépendant, collaboratif et totalement gratuit (licence GNU GPL).

III.3.4. Microsoft Excel : Il a été utilisé pour le traitement et l'analyse des données dendrométriques extraites des nuages de points issus du LiDAR TLS. Il a permis d'organiser les données obtenues après le traitement des scans et de réaliser les calculs nécessaires à l'estimation de plusieurs paramètres forestiers, notamment le diamètre des arbres, leur hauteur totale, ainsi que le volume des grumes et des branches. Les fonctions de calcul d'Excel ont facilité l'automatisation des traitements, la vérification des résultats et la synthèse des données sous forme de tableaux et de graphiques, contribuant ainsi à l'interprétation et à la présentation des résultats de l'étude.

III.4. Matériel utilisé :

III.4.1. Ordinateur portable : DELL précision 7550, processeur i7 13ème génération double carte graphique, RAM 32GO, VRAM 4GO.

III.4.2. Scans LiDAR terrestres (FARO Focus S 150) : Le Faro Focus S (photo 1), un scanner laser 3D terrestre de qualité industrielle, reconnu pour sa compacité et sa précision. Il offre une méthode qui utilise le laser pour déterminer la distance entre un capteur et un objet ou une surface, comme le sol ou la végétation. Le LiDAR terrestre est employé dans le cadre de

l'inventaire forestier afin de collecter des informations précises sur la structure de la forêt, la topographie du sol, et les caractéristiques individuelles des arbres (photo III.1).



Photo III.1 : LiDAR terrestre utilisé lors de cette étude (Faro Focus S)

III.4.3. Damiers : Les damiers sont des cibles planes carrées constituées d'un motif noir et blanc en forme d'échiquier. Ils sont placés dans la zone à scanner avant l'acquisition.

III.4.4. Sphères : Les sphères sont des objets de forme sphérique placés dans la zone à scanner avant l'acquisition.

III.4.5. Compas forestier : C'est un instrument de mesure utilisé en inventaire forestier pour déterminer rapidement le diamètre des arbres.

III.4.6. Jalonnettes : Ce sont des tiges graduées ou colorées utilisées pour délimiter les placettes d'inventaire.

Décamètre : Ruban de mesure dont la longueur est généralement de 10 à 50 m. Il est utilisé pour mesurer les distances, délimiter les placettes d'échantillonnage et relever les dimensions des parcelles d'étude sur le terrain.

III.5. Méthodologie adoptée

Le calcul précis la biomasse, tels que la hauteur, le diamètre et le volume des arbres, est essentiel pour la gestion forestière durable et l'évaluation des ressources. Traditionnellement, ces paramètres étaient mesurés manuellement, ce qui était laborieux et sujet à des erreurs. L'avènement des données LiDAR (TLS) a révolutionné cette pratique.

La méthodologie adoptée pour le calcul de la biomasse par utilisation des données TLS comprend les étapes suivantes (Figure III.1) :

III.5.1. Détermination des placette échantillonnage : Les placettes d'échantillonnage forestières sont des zones délimitées dans une forêt où les arbres sont mesurés et inventoriés pour fournir des informations sur les caractéristiques de la forêt.

L'échantillonnage forestier est une méthode statistique utilisée pour estimer diverses caractéristiques des forêts, telles que la densité des arbres, le volume du bois, la biomasse, la composition des espèces et d'autres paramètres importants. Cette méthode repose sur la collecte d'informations à partir d'un sous-ensemble (échantillon) d'une forêt plus grande, afin de fournir des estimations représentatives de l'ensemble de la zone forestière.

III.5.2. Acquisition des données TLS : Les données TLS sont collectées à l'aide d'un scanner TLS. Les paramètres d'acquisition, tels que la résolution et la fréquence d'échantillonnage, sont optimisés pour l'application spécifique.

III.5.3. Traitement des données : Les données TLS sont filtrées pour supprimer le bruit et les points aberrants. Les points appartenant aux arbres sont ensuite segmentés des autres objets (par exemple, le sol, la végétation).

III.5.4. Extraction de la biomasse : la biomasse, tels que la hauteur, le diamètre et le volume, sont extraits des données segmentées à l'aide d'algorithmes automatisés.

III.5.5. Validation des résultats : Les résultats obtenus à partir des données TLS sont comparés aux mesures manuelles par la méthode classique en utilisant les instruments de mesure des

diamètres et hauteur, sur les deux échantillons sélectionnés. La précision et l'exactitude des résultats sont évaluées.

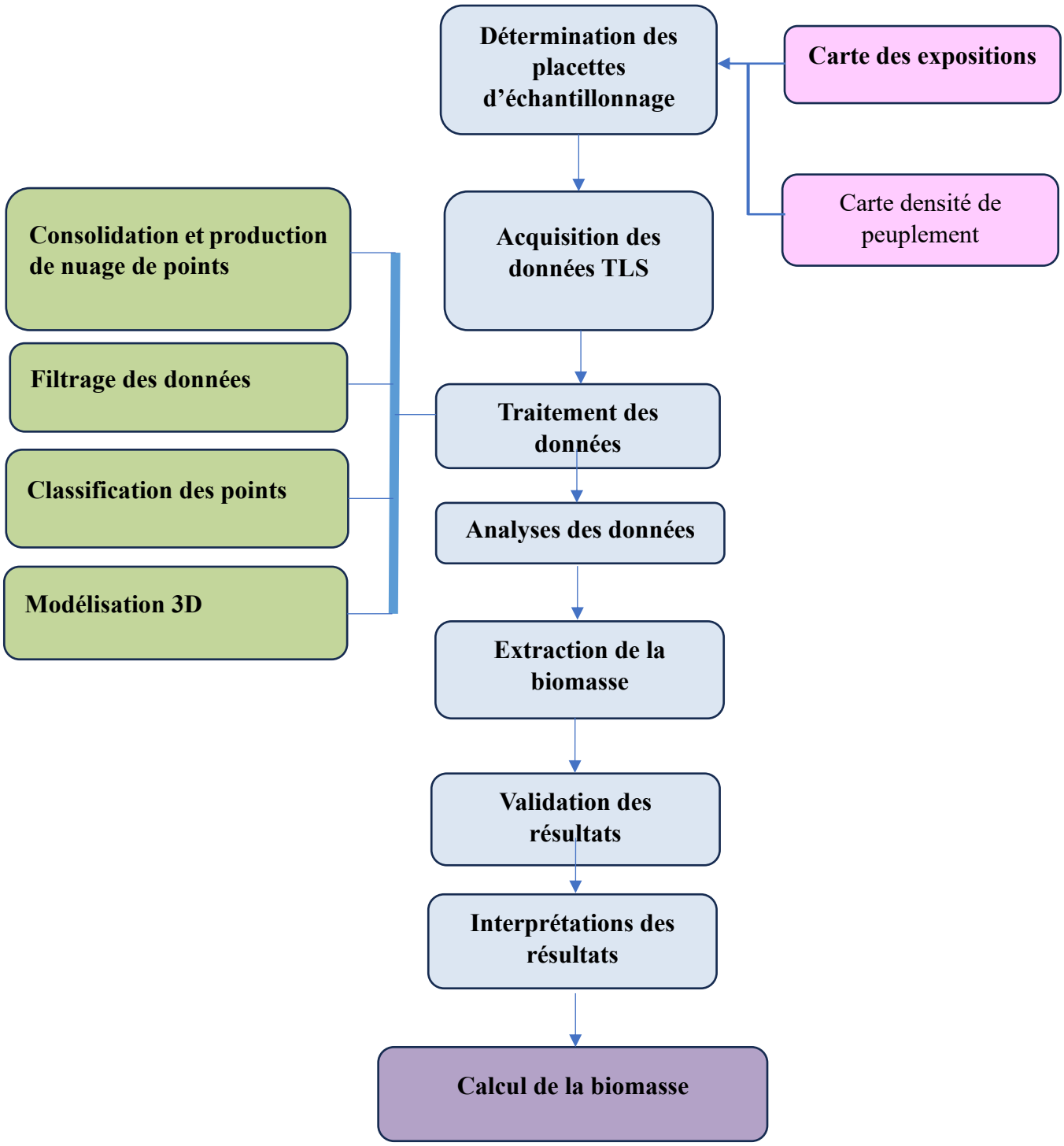


Figure III.1 : Organigramme méthodologique

III.6. Principes de base de l'échantillonnage forestier

III.6.1. Objectifs de l'échantillonnage forestier :

L'échantillonnage forestier vise à obtenir des données précises et fiables sur les caractéristiques des forêts sans avoir à mesurer chaque arbre individuellement. Cela permet de prendre des décisions éclairées en matière de gestion forestière, de planification de la récolte, de suivi de l'état de la forêt et de la biodiversité, ainsi que pour évaluer les ressources disponibles.

III.6.2. Types d'échantillonnage :

Il existe plusieurs méthodes d'échantillonnage forestier, notamment l'échantillonnage aléatoire simple, l'échantillonnage systématique, l'échantillonnage par stratification et d'autres. Chaque méthode a ses avantages et ses limites, et le choix dépendra des objectifs spécifiques de l'étude et des caractéristiques de la forêt.

III.6.2.1. L'échantillonnage aléatoire stratifié est utilisé dans notre travail cette technique statistique largement utilisée dans laquelle une population est divisée en différents sous-groupes, ou strates, en fonction de certaines caractéristiques communes. Le but de la stratification est de s'assurer que chaque strate de l'échantillon et de faire des inférences sur des sous-groupes de population spécifiques.

III.6.2.2. L'échantillonnage aléatoire stratifié est une méthode d'échantillonnage probabiliste qui divise la population en groupes homogènes appelés strates. Les membres de chaque strate sont ensuite sélectionnés au hasard pour constituer l'échantillon.

Cette méthode permet de réduire les coûts et d'améliorer l'efficacité de l'échantillonnage en garantissant que chaque membre de la population a une chance égale d'être sélectionné.

L'échantillonnage aléatoire stratifié est également connu sous le nom d'échantillonnage par quota aléatoire. Vu l'homogénéité des peuplements et la pédologie de la zone d'étude, cette formation forestière caractérisée par le Pin d'Alep. Le facteur déterminant de l'emplacement des placettes c'est l'exposition des versants et la densité des peuplements.

Le nombre d'échantillon comprend 15 placettes, calculé à partir du taux d'échantillonnage :

$$n = \frac{S \times f}{s}$$

Où :

- S: superficie totale de la forêt (ha) ;

- f: taux d'échantillonnage 2%
- s: superficie d'une placette (ha).

$$n = \frac{76{,}81 \times 0.02}{0.1} = 15{,}3$$

Les 15placette réparties en fonction de l'exposition des versants, et de l'accessibilité du terrain (Tableau III.1).

Dans le cadre de cette étude d'évaluation de la technique TLS pour l'estimation de la biomasse, deux échantillons représentatifs de la forêt ont été sélectionnés. La même méthodologie doit être appliquée à l'ensemble des 15 placettes afin d'estimer la biomasse globale de la forêt.

Tableau III.1 : Nombre des placettes

Exposition	**Superficie (ha)**	**Superficie (%)**	**Nombre de placettes**
Est	1,83	2,38	0
Sud	22,80	29,68	5
Ouest	17,79	23,16	3
Nord	34,40	44,78	7
Total	**76,81**	**100,00**	**15,00**

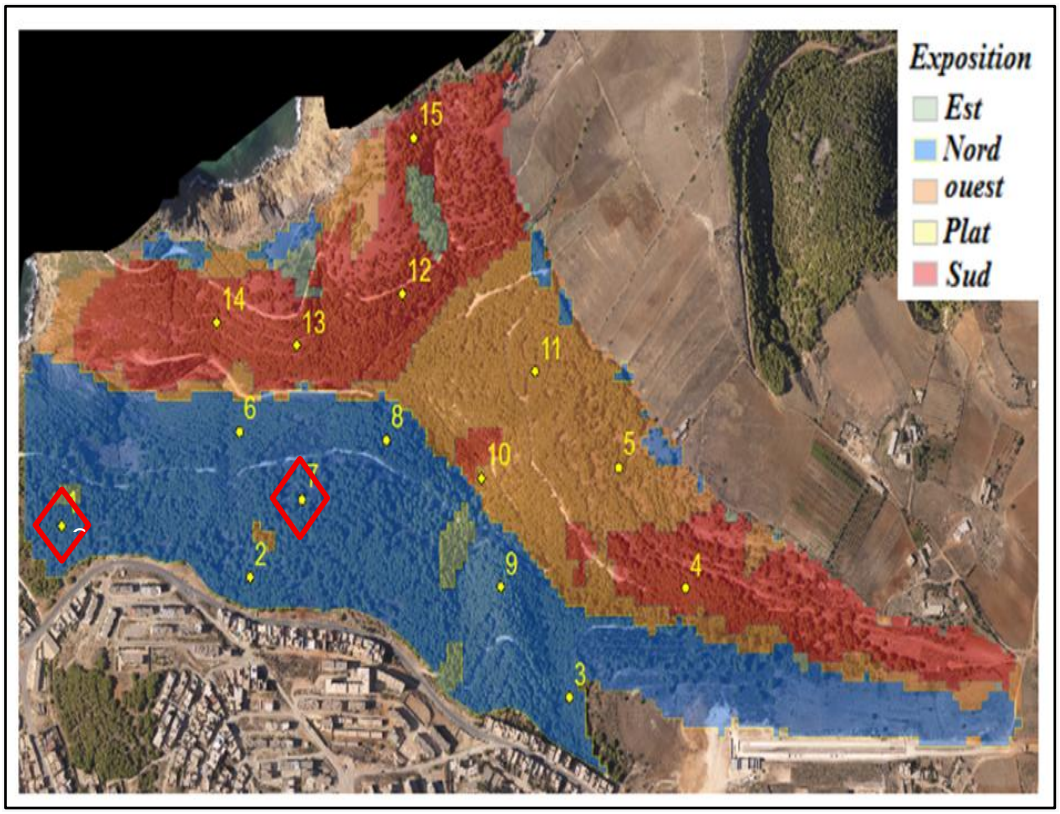


Figure III.2 : Répartition des placettes d'échantillonnages

III.7. Taille de l'échantillon :

La surface de la placette d'échantillonnage est de 0,1 hectare, délimitée sur le terrain à l'aide d'un décamètre, en respectant une distance de 22,36 mètres du centre de la placette (Figure III.3)

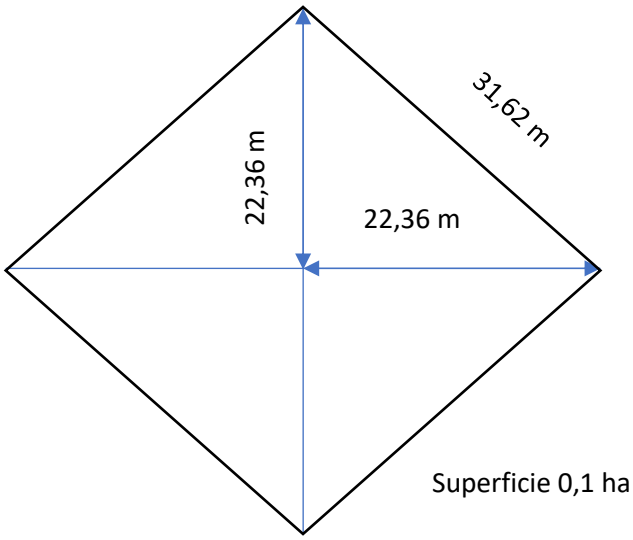


Figure III.3 : Dimensions de la placette d'échantillonnage

III.8. Applications de l'échantillonnage :

L'échantillonnage forestier est utilisé dans divers domaines, notamment la gestion forestière durable, la planification de la récolte, la conservation de la biodiversité, la surveillance des changements environnementaux et l'évaluation des ressources naturelles.

En résumé, l'échantillonnage est une étape essentielle dans la détermination des paramètres dendrométriques par scanner terrestre. Il permet aux chercheurs et aux praticiens d'estimer avec précision les caractéristiques des arbres dans une zone d'étude donnée, tout en réduisant les coûts et en gagnant du temps.

Dans le cadre de cette étude, 15 placettes ont été initialement retenues. Toutefois, seules deux placettes représentatif, sélectionnées en fonction de la densité du peuplement, ont fait l'objet d'un levé détaillé. La placette 1 correspond à un peuplement de densité relativement élevée, alors que la placette 2 est représentative d'un peuplement à faible densité. (Figure III.4 et Figure III.5)

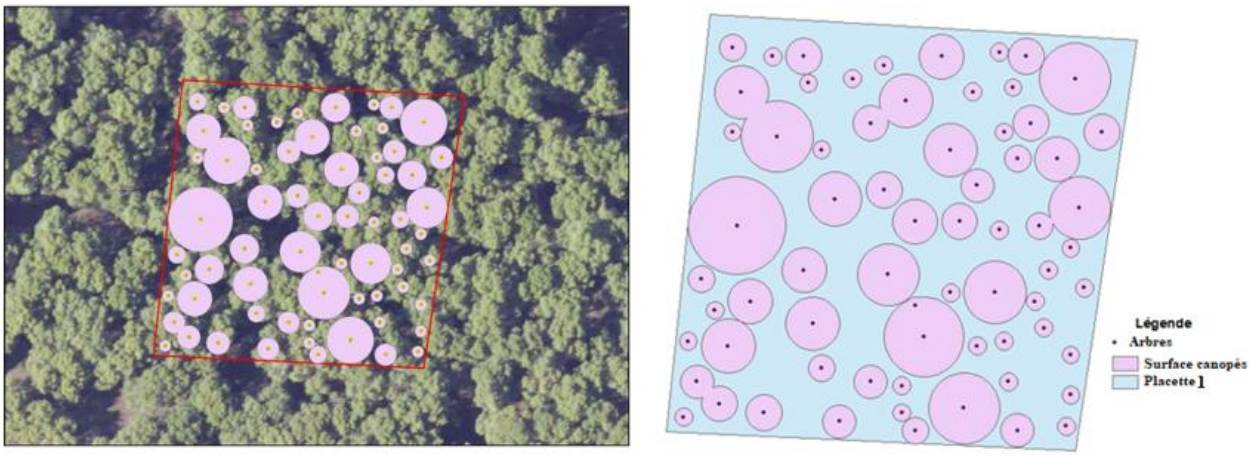


Figure III.4 : Carte de densité de la placette échantillonnage 1

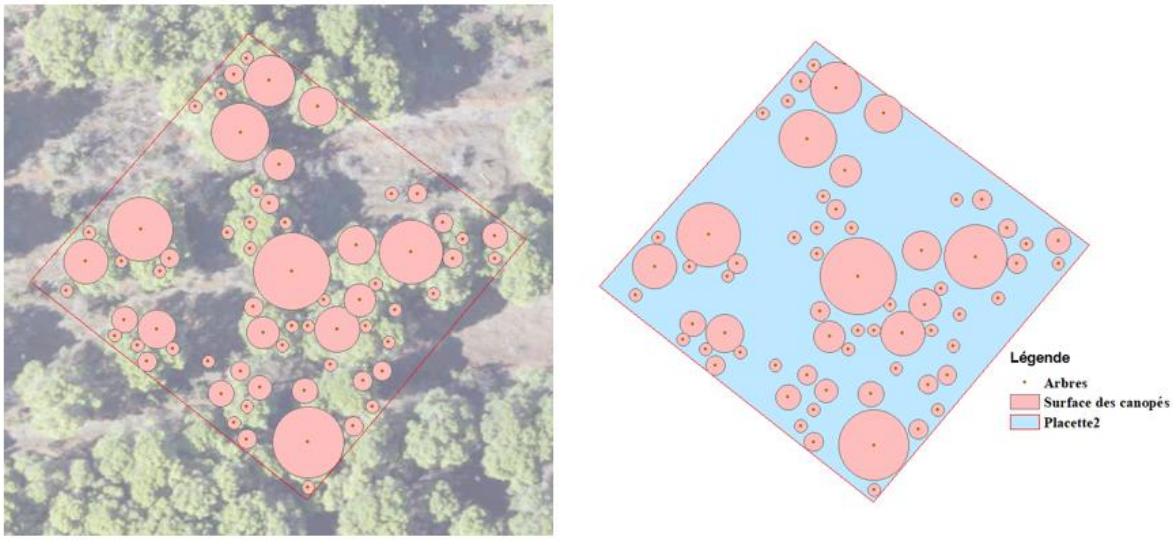


Figure III.5 : Carte de densité de la placette échantillonnage 2

III.9. Levées des placettes d'échantillonnages par TLS

III.9.1. Levées des données TLS

III.9.1.1. Méthodologie adoptée pour la compagne des scannes par TLS :

Les cibles de consolidation sont importantes dans les traitements des données LiDAR terrestres car elles facilitent la simplification, la réduction du bruit, la segmentation d'objets, la modélisation 3D simplifiée et l'optimisation des calculs. Elles offrent des outils essentiels pour gérer et analyser efficacement les vastes quantités de données générées par les capteurs LiDAR terrestres. Vue les conditions topographiques très variable et la présence de la broussaille dans les milieux forestiers nous avons proposé une nouvelle méthodologie et des nouveaux dispositive de levées par scanner laser.

III.9.1.1.1. Protocole de mesure TLS

La récente méthodologie de mesure LiDAR TLS, accompagnée de dispositifs de relevé innovants, simplifie la fusion des scans et augmente nettement la précision et l'efficacité. Elle offre des représentations précises de la structure et de la géométrie des arbres, permettant ainsi une meilleure estimation des paramètres dendrométriques.

III.9.1.1.2. Caractéristiques et emplacement des scannes de la placette

Les levés des placettes d'échantillonnage sont effectués à l'aide de neuf scans qui couvrent l'intégralité de la placette. Cette opération de scan est constituée d'un scan central positionné au centre de la placette, de quatre scans couvrant les coins et de quatre autres couvrant les limites latérales de la placette (Figure III.6). Ces neuf positions sont déterminées avec soin afin de minimiser tout effet de masque éventuel causé par la présence d'arbres volumineux à proximité.

III.9.1.1.3. Configuration des paramètres de numérisation du scanner FARO

Les paramètres de numérisation, tels que la résolution, la qualité ou les angles de numérisation, sont les paramètres utilisés par le scanner pour enregistrer les données de numérisation. L'appareil est configuré pour balayer une plage angulaire de 360° × 320° en résolution ¼, le paramètre de qualité de scannage «X-Control » réglé sur 4x, nous avons scanné environ 20 minutes pour obtenir un nuage de 109.25 millions de points. La portée du rayon laser est limitée à 50 mètres.

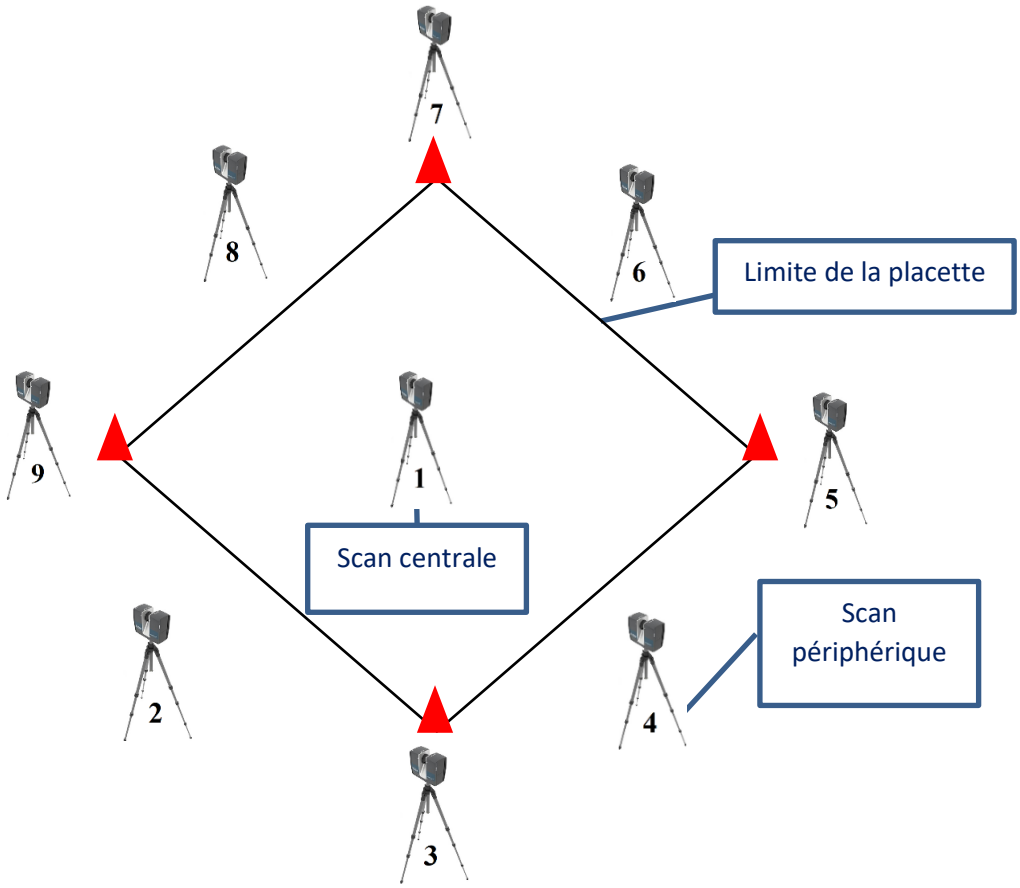


Figure III.6: organisation des scannes de la placette échantillonnage

III.9.1.1.4. Protocol d'organisation des sphères et damiers

Les sphères utilisées pour la consolidation des scannes ce divise en deux types des sphères de rebouclage fixe et parqué par des numéros durant toute l'observation de la placette et des sphères déplacent en gardent quelque sphère commune entre les deux scanne successive. Pour plus de précision dans le traitement des données LiDAR nous avons ajouté des damiers ces dernier est observé par deux scanne ou plusieurs (Figure III.7).

III.9.1.1.5. Emplacement des sphères et les damiers

Les sphères utilisées pour la consolidation des scannes ce divise en deux types des sphères de rebouclage fixe et parqué par des numéros durant toute l'observation de la placette et des sphères déplacent en gardent quelque sphère commune entre les deux scanne successive. Pour plus de précision dans le traitement des données LiDAR nous avons ajouté des damiers ces dernier est observé par deux scanne ou plusieurs (Figure III.7).

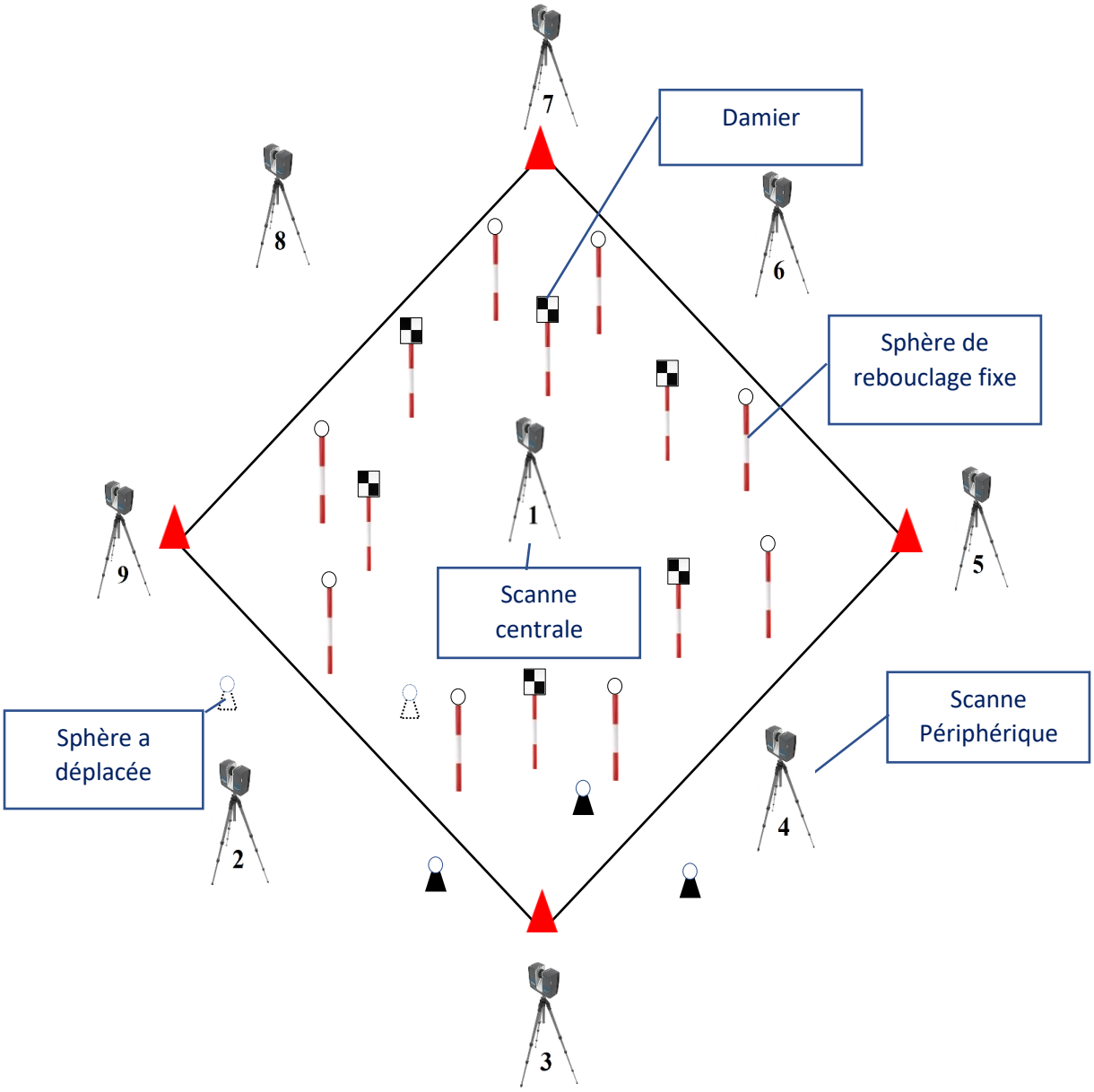


Figure III.7 : Organisation des sphères et damiers sur la placette échantillonnage

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV.1. Levée de la placette d'échantillonnages 1

IV.1.1. Délimitation de la placette

Des jalonnettes sont installées pour délimiter précisément les limites de la placette d'échantillonnage (Figure IV.1).



Figure IV.1 : Délimitation de la placette 1 sur terrain

IV.1.2. Caractéristiques des scannes

Les scans sont répartis de manière stratégique pour capturer tous les détails de la placette tout en évitant les effets de masque, où des zones pourraient être ombragées ou cachées. Cette répartition est soigneusement planifiée afin que les observations couvrent l'ensemble de la surface des arbres. Cela garantit une collecte exhaustive des données, permettant ainsi une analyse précise de la structure et de la composition de la placette forestière. En veillant à ce que chaque partie de la placette soit couverte par les scans, on s'assure de recueillir des informations complètes et représentatives, nécessaires pour des évaluations précises de la biomasse (Figure IV.2).

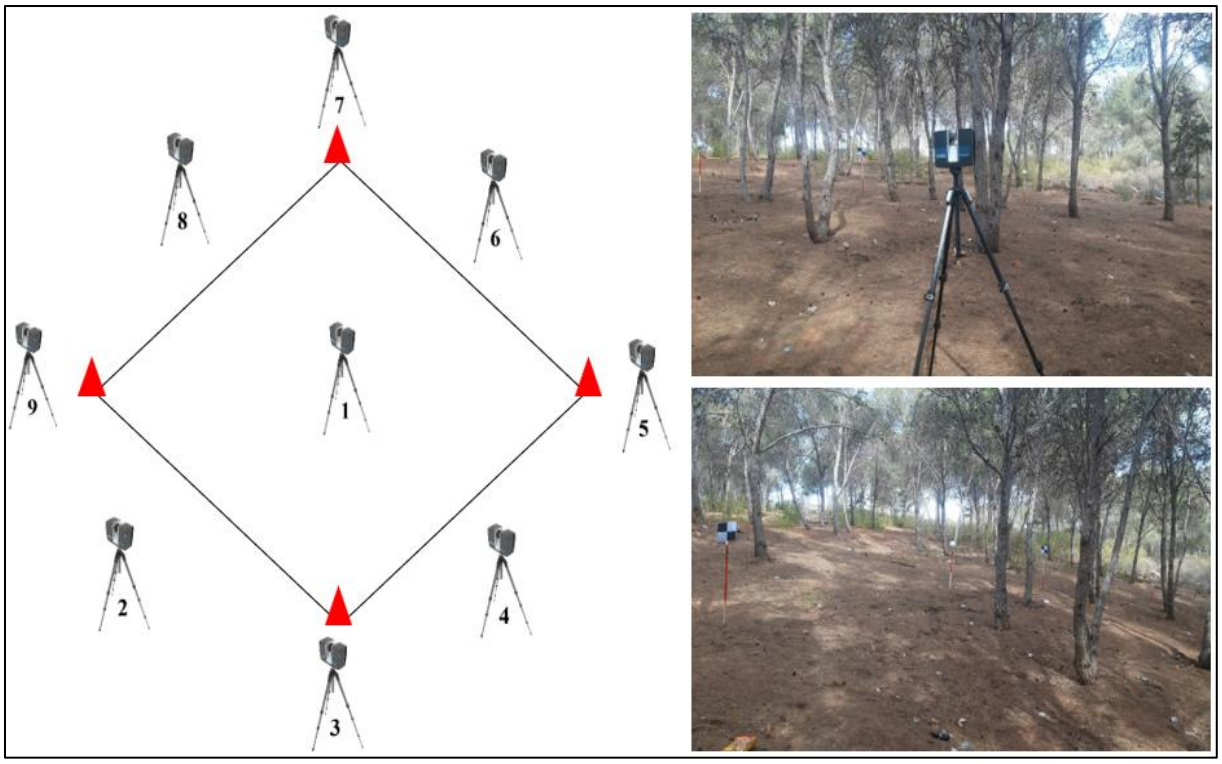


Figure IV.2 : Répartition des scannes sur la placette 1

IV.1.3. Description de placette d'échantillonnage

- **Nombre des scannes :** 09
- **La durée de scanne :** 20 minutes
- **La durée d'observation des scannes :** 9h25 – 13h40
- **La qualité :** 4x
- **Coordonnées du centre de la placette :** Longitude 1° 22' 16.15", Latitude 35° 18' 38.24"
- **Espèce dominante :** Pin d'Alep
- **Les espèces associées :** Quelque sujet de Cypré
- **Exposition :** Nord
- **Stade évolutif :** Gaulis
- **Type du Sol :** Brun
- **Traitement sylvicole :** Travaux d'assainissement, la placette est caractérisée par un faible sous-bois.

IV.2 Traitement de consolidation des scannes de la placette 1

IV.2.1. Importation des données

Cette phase permet d'importer les données LiDAR terrestres recueillies dans Faro Scène. Le programme est compatible avec plusieurs formats de fichiers LiDAR.

IV.2.2. Visualisation des données

La visualisation des données LiDAR terrestre dans une vue 3D interactive, avec utilisation des outils de navigation du logiciel Faro Scène pour zoomer, faire pivoter et exploité le nuage de points. Les scannes sont soigneusement ajusté, avec un chevauchement significatif (Figure IV.3).

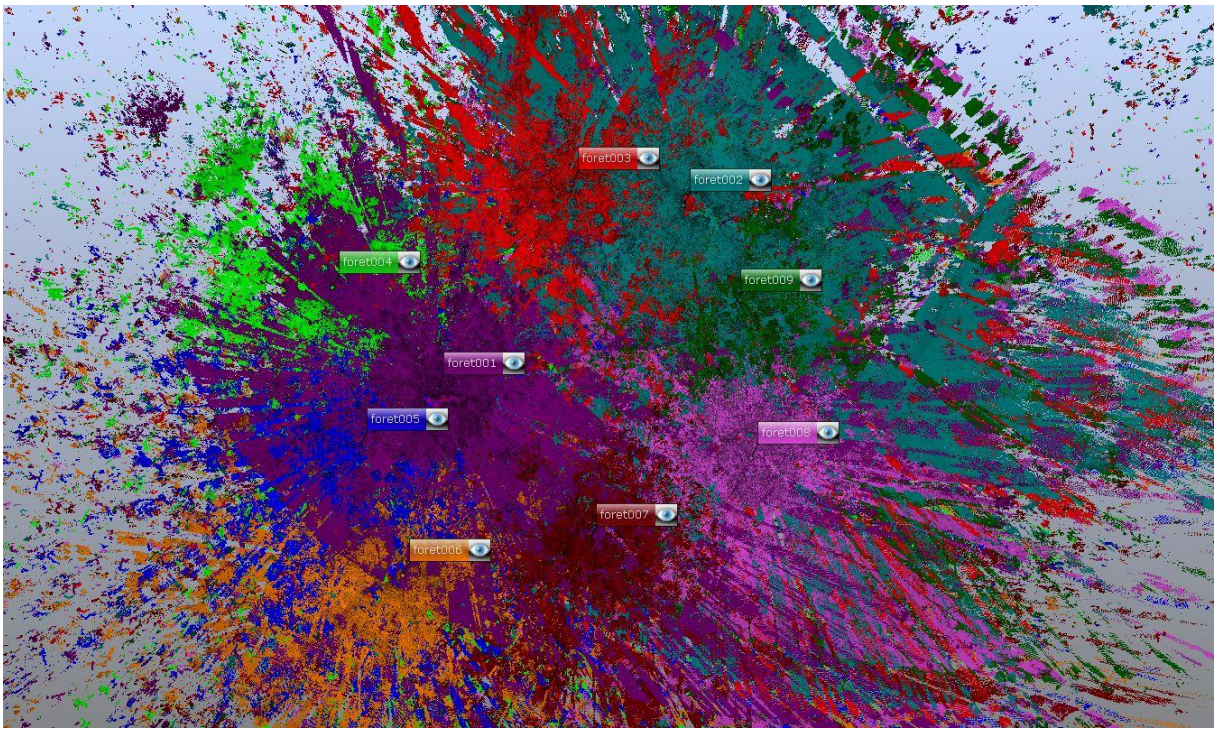


Figure IV.3 : Visualisation des scannes de la placette 1 dans Faro Scène

IV.2.3. Traitement de consolidation des scannes

Le traitement des numérisations implique une série d'étapes méticuleusement planifiées, influencées par divers paramètres. Ces étapes peuvent inclure :

- **Création des nuages de points pour la numérisation**

  Faro Scène simplifie la création de nuages de points en transformant les données brutes des scanners Faro en une représentation précise en 3D de la surface numérisée. Grâce à des algorithmes avancés.

❖ **Colorisation des numérisations**

Notre numérisation prise par un scanner avec l'option couleur, cette numérisation contiendra également les images numériques que le scanner avait prises automatiquement lors de la numérisation. Ces images sont appliquées pour colorer la numérisation.

❖ **Application de filtre de point de numérisation sombres**

Le filtre de points de numérisation sombres supprime tous les points en fonction d'une valeur de réflexion. Seuil de reflet indique la valeur de réflexion minimale.

❖ **Application de filtre basé sur la distance**

Le filtre « basé distance » retire simplement tous les points de numérisation qui se trouvent en dehors d'une certaine plage de distance. Tous les points avec une distance inférieure à la Distance minimale seront supprimés dans notre étude la distance est fixé à 40m

❖ **Application de filtre de point perdus**

Le filtre de points perdus vérifie si la cellule de la grille 2D d'un point de numérisation contient un pourcentage suffisant de points avec une distance similaire au point de numérisation lui-même.

❖ **Application de filtre d'artefact de bord**

Le filtre d'artefact de bord est activé par défaut. Ce filtre est particulièrement utile pour supprimer les artefacts situés aux bords des objets.

❖ **Recherche des cibles (Sphères et damiers)**

L'étape de la rechercher des cibles permet de sélectionner des cibles telles que les damiers et les sphères. Ceux-ci seront alors recherchés dans chaque numérisation pendant le traitement et utilisé comme points de référence pour la consolidation des scannes (Figure IV.4).



Figure IV.4 : Les sphères et les damiers utilisé durant l'étape de consolidation

Chaque étape est adaptée en fonction de facteurs tels que la résolution des scans, la qualité des données, la complexité de l'environnement, et les objectifs spécifiques de l'analyse. En coordonnant ces étapes avec précision, des résultats fiables et significatifs ont été obtenus à partir des scans réalisés.

IV.2.4. Enregistrement et consolidation des numérisations

Comme nous l'avons vu précédemment la placette a été numérisée selon neuf points de vue différents. Les nuages de points résultants de ces neuf numérisations sont orientés selon un repère relatif au scanner laser et à sa position lors de la prise de mesure. Il faut donc regrouper

dans un même système de coordonnées l'ensemble des nuages de points. Cette opération s'appelle la consolidation des scans, permettant aux utilisateurs de créer des modèles 3D précis et complets (Figure IV.5).



Figure IV.5 : Consolidation et modélisation 3D de la placette

IV.2.5. Évaluation de la précision de la consolidation des numérisations

L'évaluation de la précision de la consolidation des numérisations est essentielle pour garantir la fiabilité et l'exactitude des données résultantes. Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour évaluer la précision :

- **Analyse des cibles de contrôle**
- **Analyse des chevauchements**

- **Évaluation visuelle**

Enregistrement avec des sphères et damiers

Les erreurs de numérisation indiquées dans le tableau IV.1 sont relativement très faibles, ce qui suggère que le nuage de points est de bonne qualité. Les erreurs maximales sont faibles et l'erreur moyenne est également faible. De plus, le chevauchement minimum est supérieur à 33,1 %, Cela suggère que la consolidation du nuage de points a été réussie pour tout la placette. Ces informations suggèrent que le nuage de points est précis et fiable ce qui le rend approprié pour l'application dans la modélisation de la géométrie des arbres.

Tableau IV.1: Evaluation de l'enregistrement

Code couleurs		
Erreurs de point	< 8 mm	> 20 mm
Chevauchement	> 25,0 %	< 10,0 %
Erreur de distance	< 20 mm	> 40 mm
Erreur horizontale	< 20 mm	> 40 mm
Erreur verticale	< 20 mm	> 40 mm
Erreur angulaire	< 0,5 deg	> 1,0 deg
Statistique des points de numérisation		
Erreurs de point maximales		8,2 mm
Erreur moyenne des points		6,8 mm
Chevauchement minimum		33,1 %
Statistique des cibles de numérisation		
Max. Erreur de distance		18,3 mm
Erreur de distance moyenne		7,4 mm
Max. Erreur horizontale		17,9 mm

Erreur horizontale moyenne		7,3 mm
Max. Erreur verticale		3,9 mm
Erreur verticale moyenne		1,2 mm

- **Exploration des scannes**

Le traitement de numérisation 3D avancé fourni un ensemble complet de fonctionnalités d'analyse pour une inspection détaillée des scans. Ces fonctionnalités permis d'extraire des informations précises et exploitables à partir des données de numérisation, à partir des résultats de la phase de consolidation ont pu créer un nuage de points de **565 125 546** points.

IV.2.6. Extraction de la placette échantillonnage :

L'extraction de placettes d'échantillonnage à partir du nuage de points LiDAR constitue une étape fondamentale dans la collecte de données environnementales. En respectant la taille d'échantillon définie au préalable, cette opération permet de sélectionner des zones représentatives de l'environnement étudié, fournissant ainsi des données de haute qualité pour les analyses et les modélisations subséquentes (Figure IV.6).

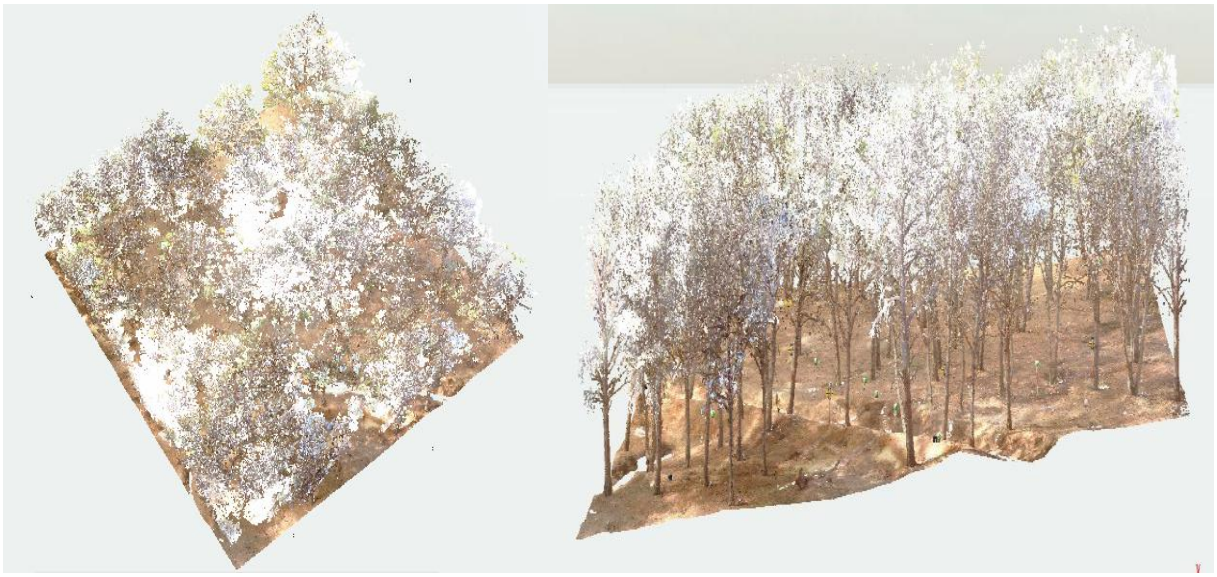


Figure IV.6 : Extraction de la placette d'échantillonnage 1

IV.2.7. Filtrage et nettoyage des numérisations

Le processus de nettoyage des données LiDAR terrestre revêt une importance capitale pour garantir la qualité et la précision des modèles 3D générés, en particulier lorsqu'il s'agit de

modéliser des éléments naturels tels que les arbres. Cette opération vise à éliminer plusieurs types de points indésirables, notamment les points au sol, les points en mouvement, les objets excédentaires et la broussaille, afin d'optimiser la modélisation des arbres en 3D.

Tout d'abord, le nettoyage des points au sol est essentiel. Les données LiDAR peuvent contenir de nombreux points représentant le sol environnant, qui ne sont pas pertinents pour la modélisation des arbres. En supprimant ces points, on réduit le bruit et on améliore la qualité des données, ce qui facilite la détection et la reconstruction des formes des arbres.

Ensuite, les points en mouvement doivent être identifiés et éliminés. Ces points peuvent provenir de sources telles que les personnes en déplacement, qui peuvent introduire des erreurs indésirables dans les données LiDAR. En les filtrant, on s'assure que seuls les points statiques, représentant les caractéristiques permanentes de l'environnement, sont utilisés pour la modélisation.

En outre, les objets excédentaires, tels que les structures artificielles ou les débris, doivent être détectés et éliminés. Ces objets peuvent fausser les résultats de la modélisation et doivent donc être supprimés pour obtenir une représentation précise de la végétation environnante.

Enfin, la broussaille, telle que les buissons denses ou les hautes herbes, peut également perturber la modélisation des arbres en 3D. En nettoyant ces éléments, on simplifie la scène et on concentre l'analyse sur les structures arborescentes principales (Figure IV.7)



Figure IV.7 : Nettoyage des numérisations de la placette 1

IV.3. Modélisation de la géométrie des arbres

Pour isoler les arbres à partir d'un nuage de points LiDAR en utilisant l'outil individual-tree isolator (TreeIso) nous avons suivi les étapes suivantes :

IV.3.1. Chargement et visualisation du nuage de points :

Après avoir chargé le nuage de points, nous avons assurez qu'il est correctement visualisé. Nous ajustons les paramètres d'affichage selon nos besoins, tels que la couleur, la taille des points, etc. (Figure IV.8).

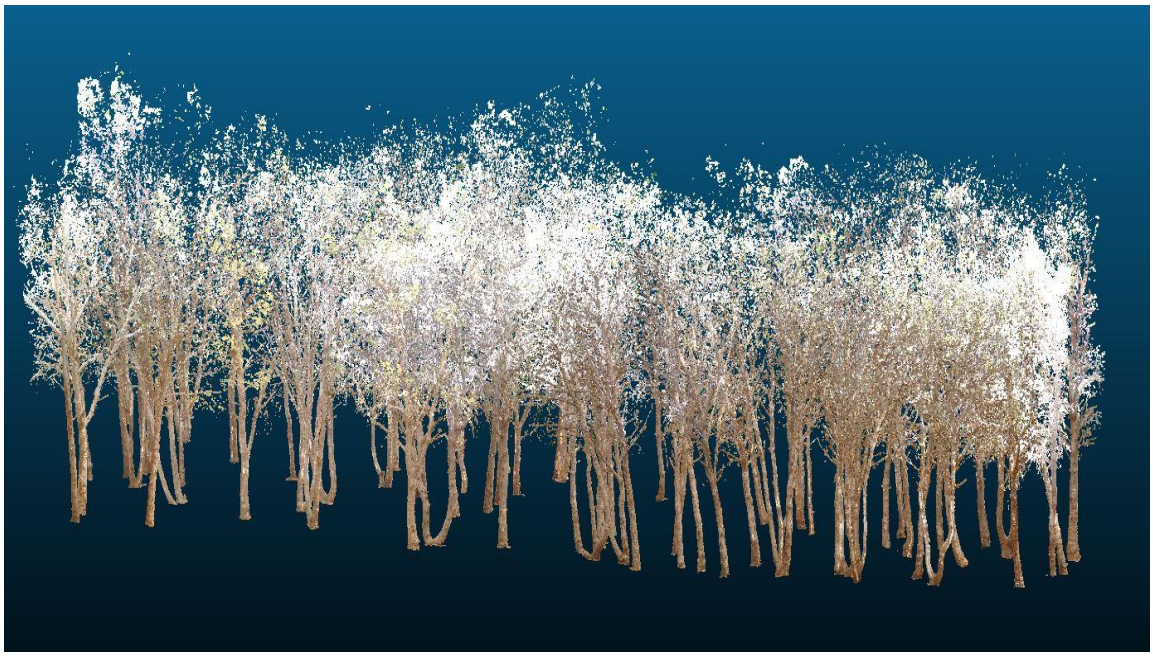


Figure IV.8 : Chargement des nuages de points

IV.3.2. Validation visuelle :

Après avoir segmenté les arbres, nous validons visuellement les résultats pour vous assurer qu'ils correspondent bien aux arbres dans le paysage. Nous pouvons utiliser différentes vues et angles pour vérifier la qualité de l'isolement des arbres.

IV.3.3. Extraction des arbres :

Une fois que nous êtes satisfait du résultat, nous avons extraire les arbres isolés en tant que nouveaux sous-ensembles de points. Cette étape nous permettre de travailler spécifiquement sur les données des arbres pour des analyses ultérieures (Figure IV.9).

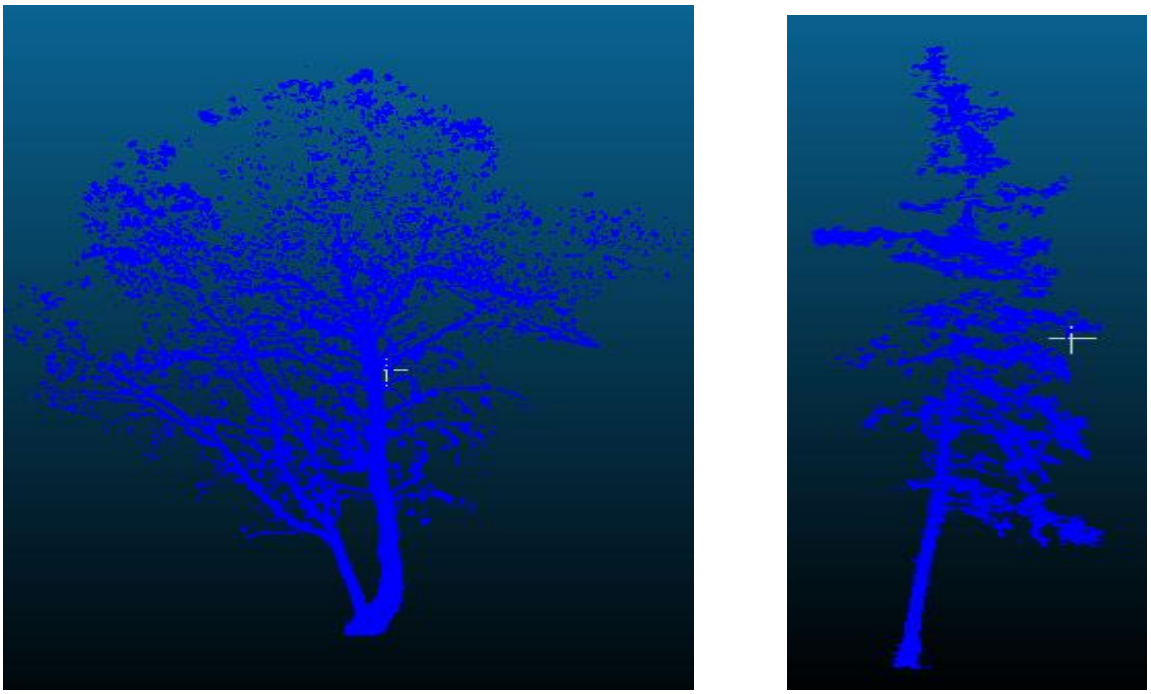


Figure IV.9 : Extraction des arbres

IV.4. Estimation de la biomasse par modélisation 3D

IV.4.1. Modélisation des arbres de la placette 1

Computree est une plateforme collaborative publiée sous LGPL (Lesser General Public License) pour le traitement de données 3D pour les applications forestières. A partir de 2010, le département de Recherche, Développement et Innovation (RDI) de l'Office national des forêts l'ONF a développé Computree, Initialement centrée sur le traitement des données LiDAR terrestre, la plateforme a été ouverte aux autres sources de données telles que le LiDAR aérien à partir de 2014.

Afin d'estimer des variables dendrométriques importantes pour l'estimation de la biomasse forestière. L'accent est également mis sur la performance des calculs, afin d'obtenir des temps d'analyse des nuages de points compatibles avec une utilisation opérationnelle.

Enfin, les nuages de points traités en CloudCompare ont été exportés en fichiers de format. *xyb* pour permettre leur chargement dans le logiciel Computree. Dans le but de l'extraction des paramètres dendrométriques (Figure IV.10).

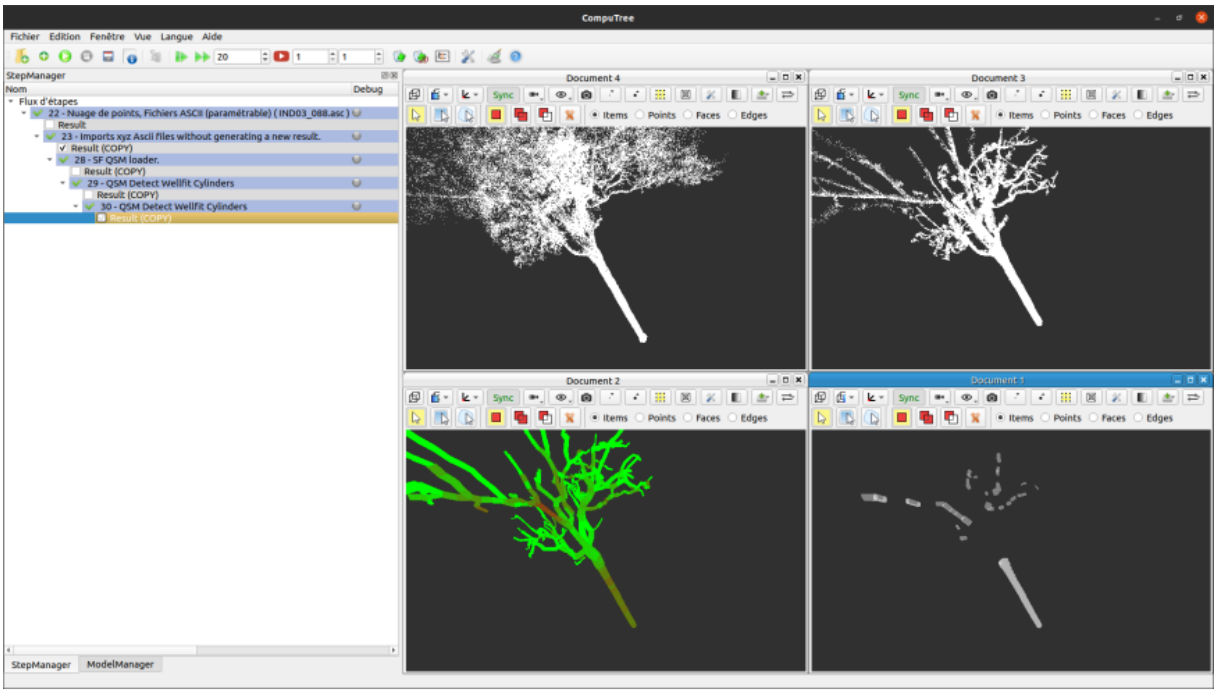


Figure IV.10 : L'interface utilisateur de Computree

IV.4.2 Segmentation des arbres

La modélisation des arbres consiste en six procédures principales, la figure IV.11 illustre le flux de travail impliqué dans le processus d'exportation, chacune étant implémentée dans au moins une étape unique pour pouvoir afficher des résultats intermédiaires.

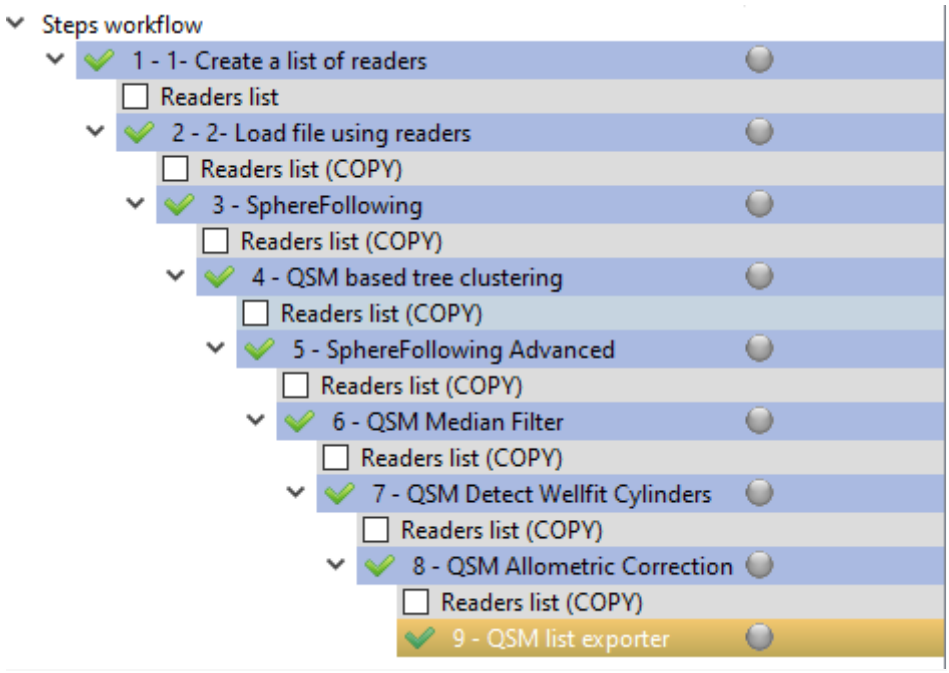


Figure IV.11 : Procédures principales pour la segmentation des arbres

- **Sphère Suivante basique**

La méthode est utilisée pour ajuster des cylindres dans un nuage de points débruité et pour construire le modèle d'arbre. Des sphères sont utilisées pour suivre la structure de ramification de l'arbre depuis la racine jusqu'à ses extrémités **(Hackenberg et al., 2014; Hackenberg, Spiecker, et al., 2015; Hackenberg, Wassenberg, et al., 2015)**. Le nuage est réduit à l'aide de la routine de réduction d'échelle de grille voxel de la bibliothèque PCL (point cloud Library) **(Rusu & Cousins, 2011)**. La taille du voxel de la routine de réduction d'échelle est un paramètre utilisateur. De plus, seul le plus grand cluster d'une routine de regroupement euclidienne avec une plage de regroupement à définir sera traité. Cela améliore l'optimisation des paramètres, car les points non accessibles n'affecteront pas la distance entre le nuage et le modèle.

L'algorithme repose sur l'utilisation des sphères avec un point central sur un axe squelette coupe le nuage de points. Tous les points à une distance de la sphère Epsilon de la surface de la sphère sont considérés comme étant utilisés pour détecter la sphère suivante et sont placés dans un sous-nuage de points.

Le cercle est agrandi avec le multiplicateur de sphère et transformé en une sphère tridimensionnelle, mais le rayon de la sphère n'est jamais autorisé à être inférieur au rayon global minimum.

La procédure est répétée de manière récursive jusqu'à ce qu'aucune autre section transversale ne puisse être trouvée.

- **Arborescence de clustérisassions basée sur la QSM**

L'étape importe un nuage d'arbres et une QSM (Quantitative Structure Model) en entrée. Chaque point du nuage est aligné sur le cylindre le plus proche. Tout d'abord, le cylindre hérite de la longueur de croissance du cylindre en tant que paramètre temporaire. Les points sont ensuite triés par leur longueur de croissance, puis divisés en nombre de clusters. Les points avec la plus grande longueur de croissance sont stockés dans le premier cluster, le point avec le plus petit dans le dernier.

- **Sphère Suivante Avancée**

La méthode est utilisée pour ajuster des cylindres dans un nuage de points débruité et pour construire le modèle d'arbre. Des sphères sont utilisées pour suivre la structure de ramification de l'arbre de la racine à ses pointes **(Hackenberg et al., 2014; Hackenberg, Spiecker, et al., 2015; Hackenberg, Wassenberg, et al., 2015)**. Le nuage d'arbres en entrée a été prétraité avec

un regroupement d'arbres basé sur le QSM. Cette routine a divisé le nuage d'arbres isolés en n groupes. Le premier groupe contient la tige et les branches principales, le dernier groupe les points des brindilles. Les groupes intermédiaires représentent la structure de ramification intermédiaire ordonnée de la tige aux brindilles.

- **Filtre médian par QSM**

La méthode importe un QSM. Les rayons des cylindres du QSM sont filtrés par filtrage médian. Cela implique de calculer le rayon médian d'une liste qui comprend le cylindre lui-même, son enfant, son petit-enfant, son arrière-petit-enfant, son parent, son grand-parent et son arrière-grand-parent. Si le rayon du cylindre s'écarte de ce rayon médian de plus d'un pourcentage spécifié, il est remplacé par le rayon médian. Ce processus permet de lisser les rayons des cylindres dans le QSM, ce qui améliore potentiellement la précision du modèle.

- **Correction allométrique par QSM**

La méthode corrige les rayons sous-estimés ou surestimés dans le QSM complet **(Hackenberg, Spiecker, et al., 2015)**. Un modèle non linéaire de la forme $\boldsymbol{y = a * X^b}$ est construit avec **y** étant le rayon et **x** un paramètre de croissance choisi par l'utilisateur, soit la croissance en volume ou la croissance en longueur. Si le rayon d'un cylindre est en dehors de la plage de correction, il sera corrigé au rayon prédit **y**.

Seuls les rayons estimés par une routine de modélisation sont pris en compte. Les rayons corrigés dans une routine de post-traitement telle que le QSM filtre médian, sont ignorés. L'algorithme n'utilise pas de cylindres près des petites branches fine ou près de la racine pour la prédiction. De plus, les cylindres ayant une croissance en volume trop petit ou trop grand sont ignorés.

Tous les autres cylindres sont utilisés pour faire un ajustement de puissance, une fois la prédiction terminée, les cylindres mal ajustés peuvent être corrigés et le résultat peut être vu dans la figure IV.12.

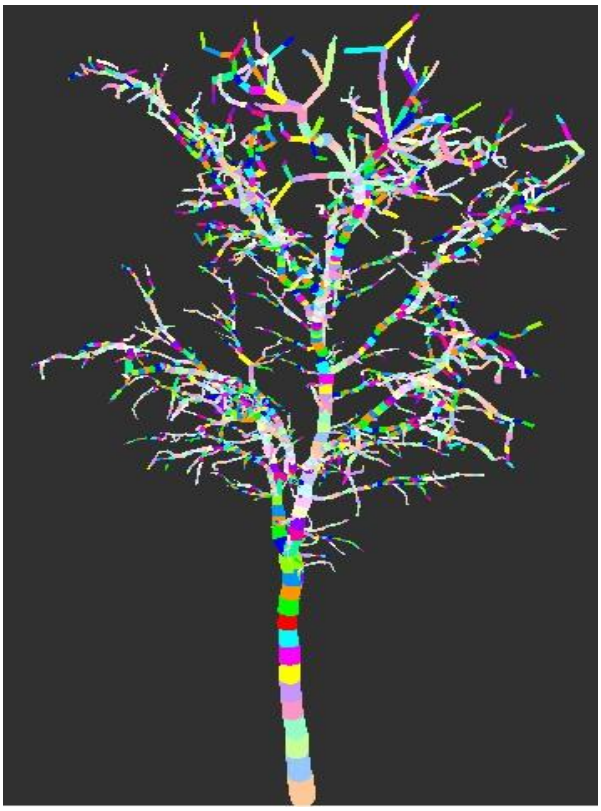
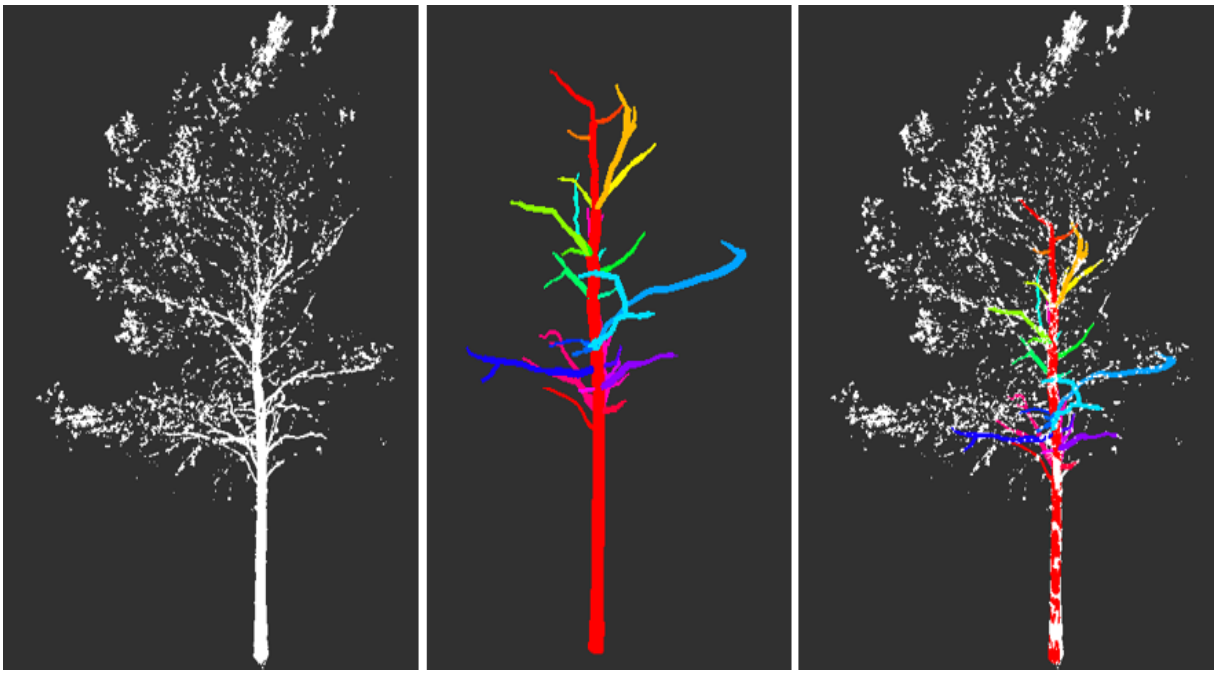


Figure IV.12 : Résultats de la Correction allométrique par QSM

IV.4.3. Détection des cylindres bien ajustés par QSM

Avec l'amélioration du QSM, la sixième étape a été réalisée en utilisant le QSM pour la détection des cylindres bien ajustés, dans le but d'estimer uniquement les cylindres de meilleure qualité à partir du modèle QSM (figure IV.13). Les entrées pour cette étape étaient les résultats de la cinquième étape et les nuages de points segmentés, où les points étaient attribués aux cylindres, ce qui a permis de générer chaque cylindre comme un sous-nuage. Cela signifie que la distance moyenne de chaque sous-nuage et du cylindre correspondant a été calculée. La sortie a été divisée en deux parties : les cylindres bien ajustés et les cylindres mal ajustés. Seuls les cylindres ayant une distance moyenne suffisamment petite ont été considérés comme bien ajustés, et les cylindres qui étaient proches des extrémités des arbres (branches fines) avec une distance moyenne plus grande ont été considérés comme mal ajustés, en raison d'erreurs plus importantes.



Figures IV.13 : Extraction des paramètres dendrométriques

IV.4.4. Exportateur de liste QSM

Les résultats ont été calculé et enregistrées dans un dossier spécifique à l'utilisateur, tandis que Les paramètres dendrométriques tel que le DBH, la hauteur, le volume, l'ordre des branches, le rayon et la longueur, etc… Ont été enregistrées dans un fichier Excel voire figure IV.14.

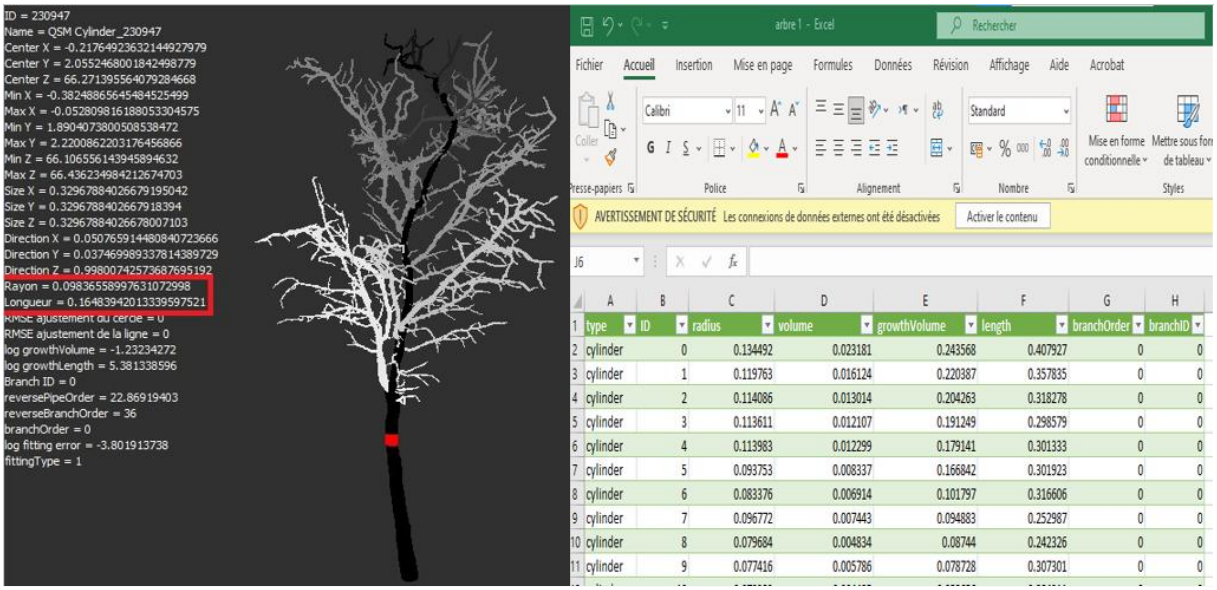


Figure IV.14 : Exportation des résultats

IV.5. Levée de la placette d'échantillonnages 2

IV.5.1Délimitation de la placette

Des piquets sont placés pour marquer avec précision les contours de la zone d'échantillonnage (Figure IV.15).



Figure IV.15 : Délimitation de la placette 2 sur terrain

IV.5.2. Caractéristiques des scannes

Les scans sont répartis de manière stratégique pour capturer tous les détails de la placette, évitant les zones masquées (Figure IV.16).

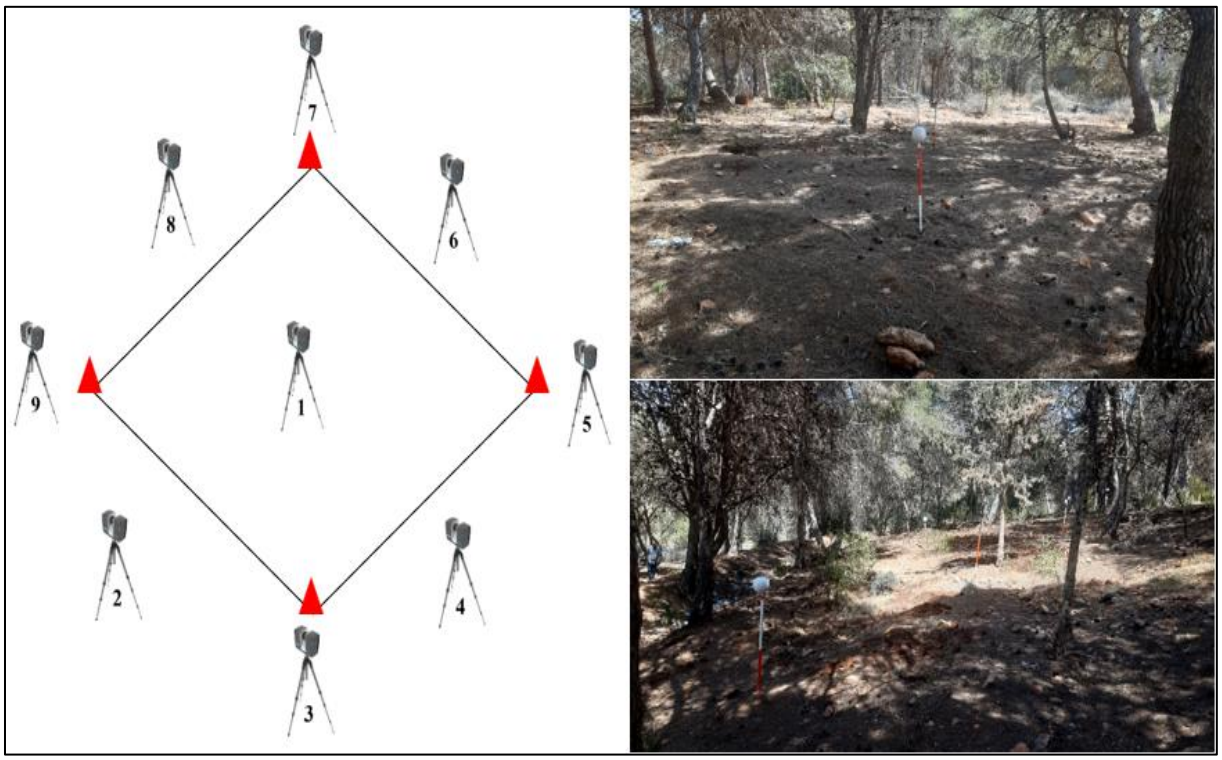


Figure IV.16 : Répartition des scannes sur la placette 2

IV.5.3. Description des placettes d'échantillonnages

- **Nombre des scannes :** 09
- **La durée de scanne :** 20 minutes
- **La qualité :** 4x
- **La durée d'observation des scannes :** 14h10 – 18h00
- **Coordonnées du centre de la placette :** Longitude 1° 21' 55.99", Latitude 35° 18' 38.36"
- **Espèce dominante :** Pin d'Alep
- **Les espèces associées :** Quelque sujet de Cypré
- **Exposition :** Nord
- **Stade évolutif :** Perchis
- **Type du Sol :** Brun
- **Traitement sylvicole :** Travaux d'assainissement, la placette est caractérisée par l'absence de sous-bois.

IV.5.4. Traitement de consolidation des scannes de la placette 2

Les traitements effectués sur la placette 2 est similaire de la placette 1avec des ajustements dans les paramètres suivant le protocole de mesure de la placette.

IV.5.4.1. Importation des données

IV.5.4.2. Visualisation des données

IV.5.4.3. Traitement des scannes

Le traitement des numérisations implique une série d'étapes méticuleusement planifiées, influencées par divers paramètres. Ces étapes peuvent inclure :

- Création des nuages de points pour la numérisation ;
- Colorisation des numérisations ;
- Application de filtre de point de numérisation sombres ;
- Application de filtre basé sur la distance ;
- Application de filtre de point perdus ;
- Application de filtre d'artefact de bord ;
- Recherche des cibles (Sphères et damiers).

L'étape de la recherche des cibles permet de sélectionner des cibles telles que les damiers et les sphères (Figure IV.17).



Figure IV.17 : Les sphères et les damiers utilisé durant l'étape de consolidation

IV.5.5. Enregistrement et consolidation des numérisations

La placette a été numérisée selon neuf points de vue différents. Les nuages de points résultants de ces neuf numérisations sont orientés selon un repère relatif au scanner laser et à sa position lors de la prise de mesure (Figure IV.18).



Figure IV.18 : Consolidation et modélisation 3D de la placette

IV.5.6. Évaluation de la précision de la consolidation des numérisations

IV.5.6.1. Enregistrement avec des sphères et damiers

Les résultats obtenus dans le tableau IV.2 suggèrent que le nuage de points est de qualité satisfaisante. Les erreurs maximales et moyennes sont relativement faibles, ce qui indique une bonne précision globale. De plus, le chevauchement minimum de plus de 31,1% est encourageant, car il garantit une meilleure représentation spatiale et une reconstruction plus précise de la géométrie des objets scannés (arbre), comme le montre la figure IV.19.

Tableau IV.2: évaluation de l'enregistrement

Code couleurs		
Erreurs de point	< 8 mm	> 20 mm
Chevauchement	> 25,0 %	< 10,0 %
Erreur de distance	< 20 mm	> 40 mm
Erreur horizontale	< 20 mm	> 40 mm
Erreur verticale	< 20 mm	> 40 mm
Erreur angulaire	< 0,5 deg	> 1,0 deg
Statistique des points de numérisation		

Erreurs de point maximales		9,1 mm
Erreur moyenne des points		7,3 mm
Chevauchement minimum		31,1 %
Statistique des cibles de numérisation		
Max. Erreur de distance		16,7 mm
Erreur de distance moyenne		5,8 mm
Max. Erreur horizontale		16,3 mm
Erreur horizontale moyenne		5,4 mm
Max. Erreur verticale		5,2 mm
Erreur verticale moyenne		1,6 mm



Figure .IV.19 : Vue 3D de la placette 2 sous Faro

IVVI.5.7. Exploration des scannes

Le traitement de numérisation 3D avancé fourni un ensemble complet de fonctionnalités d'analyse pour une inspection détaillée des scans. Un nuage de points crée avec **658 194 349** points, cette densité a permis d'extraire des informations précises et exploitables sur la modélisation des arbres.

IV.5.8. Extraction de la placette échantillonnage :

L'extraction de placettes d'échantillonnage à partir du nuage de points. En respectant la taille d'échantillon définie au préalable (Figure IV.20).

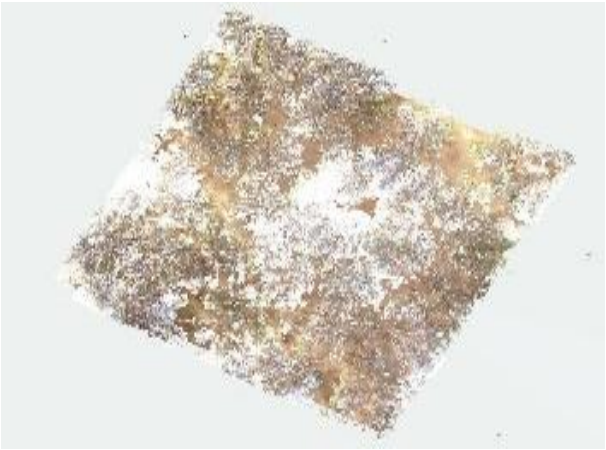


Figure IV.20 : Extraction de la placette d'échantillonnage 2

IV.5.9. Filtrage et nettoyage des numérisations

Le processus de nettoyage des données LiDAR terrestre revêt une importance capitale pour garantir la qualité et la précision des modèles 3D générés, en particulier lorsqu'il s'agit de modéliser des éléments naturels tels que les arbres. Cette opération vise à éliminer plusieurs types de points indésirables, notamment les points au sol, les points en mouvement, les objets excédentaires et la broussaille, afin d'optimiser la modélisation des arbres en 3D (Figure IV.21).

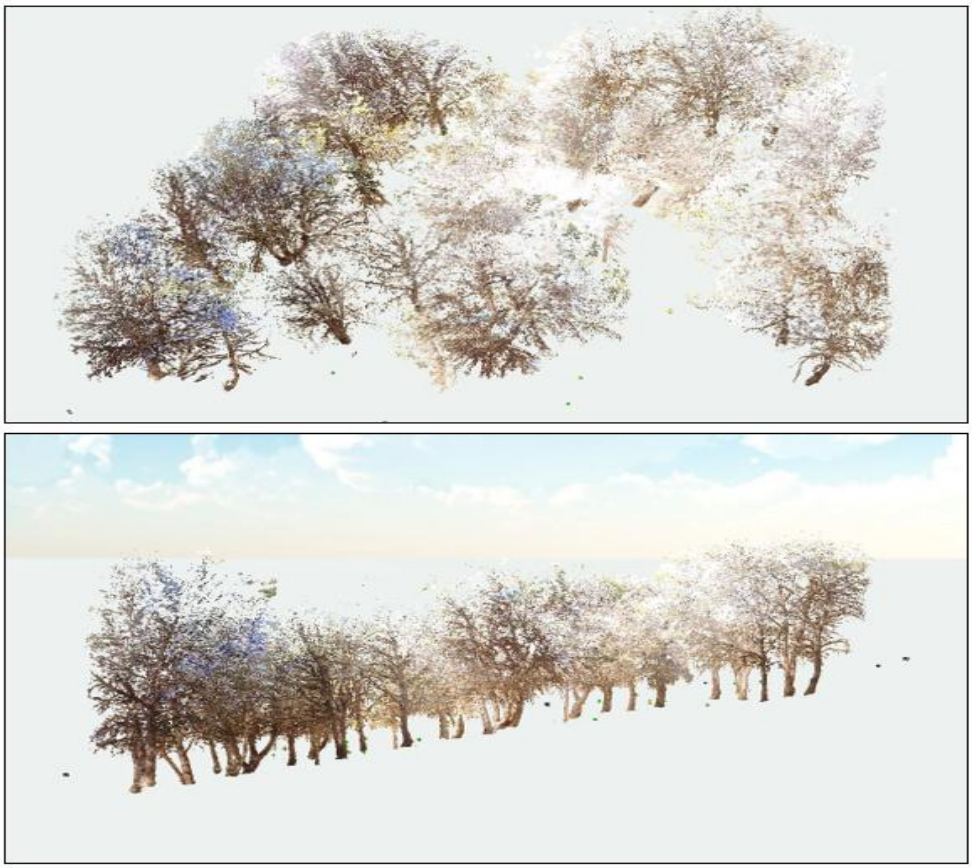


Figure IV.21 : Nettoyage des numérisations de la placette 2

VI.5.10. Modélisation de la géométrie des arbres

Pour isoler les arbres à partir d'un nuage de points LiDAR en utilisant l'outil individual-tree isolator (TreeIso) du logiciel cloud compare nous avons suivi les mêmes étapes de la placette 1 résumé comme suivantes :

- Chargement et visualisation du nuage de points ;
- Segmentation du nuage de points ;
- Validation visuelle ;
- Extraction des arbres.

IV.5.11. Estimation de la biomasse par modélisation 3D

IV.5.11.1. Modélisation des arbres de la placette 2

Pour évaluer les caractéristiques dendrométriques, nous accordons une grande importance à l'efficacité des calculs réalisés avec le logiciel Computree. Dans cette placette, nous avons suivi les mêmes étapes de modélisation que pour la placette 1, à savoir :

- Segmentation des arbres ;

- Application de la méthode de la Sphère Suivante basique ;
- Utilisation de l'arborescence de clustérisation basée sur la QSM ;
- Application de la méthode de la Sphère Suivante Avancée ;
- Filtre médian basé sur la QSM ;
- Correction allométrique basée sur la QSM ;
- Détection des cylindres bien ajustés basée sur la QSM ;
- Exportation de la liste QSM.

IV.6. Levée des paramètres dendrométriques par la méthode classique

La collecte des paramètres dendrométriques par la méthode classique consiste en plusieurs étapes traditionnelles effectuées sur le terrain. Voici comment cette méthode est généralement réalisée :

IV.6.1. Délimitation de la placette :

Sur le terrain, la placette est identifiée et localisée en utilisant les coordonnée GPS observé durant la compagne du scanner et le marquage du centre de la placette, en respectant les dimensions de la placette levé par scanner terrestre (0.1ha) (Figure IV.22).



Figure IV.22 : Délimitation de la placette 2 sur terrain

IV.6.2. Mesure du Diamètre et circonférence à Hauteur d'Homme (DBH) :

Le diamètre et circonférence à hauteur d'homme (DBH) est mesuré à une hauteur de 1,30 mètre au-dessus du sol. Cela est faite à l'aide d'un compas forestier que nous avons conçue et un ruban plastique pour mesurer les circonférences (Figure IV.23).



Figure IV.23 : A gauche : compas forestier conçue.

A droite : Mesure du Diamètre et circonférence à Hauteur d'Homme (DBH à 1,30 m)

IV.6.3. Mesure de la Hauteur Totale :

La hauteur totale de l'arbre est mesurée à l'aide d'un arbre témoin mesuré par triangulation en utilisant la croix de bucheront et les autres arbres sont estimé par rapport à cet arbre.

IV.6.4. Enregistrement des Données :

Toutes les mesures sont soigneusement enregistrées dans un carnet de terrain, ainsi le marquage des arbres levé pour éviter les erreurs (Figure IV.24). La méthode classique de collecte de la biomasse nécessite une expertise sur le terrain (tableau IV.3).



Figure IV.24 : Marquages des arbres levées

Tableau IV.3 : paramètres dendrométriques inventorie sur terrain

La placette 1											
N°	DBH (cm)	C (cm)	H (m)	N°	DBH (cm)	C (cm)	H (m)	N°	DBH (cm)	C (cm)	H (m)
01	19	59	9	29	11,5	35	9	57	17,5	55	10
02	19,5	61	9	30	18,5	55	10	58	14	38,5	8
03	23,5	69	9.5	31	17,5	52	9	59	13,5	38,5	8
04	23,5	70	10	32	21	63,5	8	60	9,5	25,5	7
05	23	64	10	33	15	44	9	61	18,5	59,5	9
06	18,5	54,5	10	34	17,5	50,5	9	62	23	70,5	9
07	22,5	65	9	35	21	64	9	63	12,5	33	10
08	18,5	51	9	36	20,5	60,5	9	64	14,5	41,5	10
09	18	53,5	9	37	16	45	10	65	17,5	52	10
10	7,5	25,5	9	38	17.5	53	9	66	12,5	35,5	10
11	10,5	28,5	8.5	39	14	45	9	67	23	66,5	11
12	13	40	8.5	40	13	35,5	9	68	13,5	40	9
13	17,5	54	10	41	13,5	40	9	69	14	47,5	9

14	17,5	54	10	**42**	17,5	50	10	**70**	13	38	9
15	21,5	69	10	**43**	17	52,5	10	**71**	13	38	9
16	18	57	9	**44**	15,5	51	9,5	**72**	16,5	51	10
17	13,5	35	7	**45**	17,5	54	9,5	**73**	14,5	52	10
18	12	36,5	8	**46**	14	40,5	9,5	**74**	10,5	29	9
19	16,5	47	10	**47**	10	26,5	8	**75**	16	48,5	10
20	21	68	11	**48**	13	38,5	9	**76**	16	46,5	9
21	14,5	41	10	**49**	18	51	9,5	**77**	14,5	41	9
22	13,5	37,5	8	**50**	19	56	10	**78**	13,5	42	9
23	15,5	48	9	**51**	14,5	45	10	**79**	13	41,5	8
24	16	51,5	9	**52**	13	39	10	**80**	14,5	41,5	8
25	16,5	48,5	9	**53**	16,5	49,5	9	**81**	18,5	57,5	9
26	20	60,5	10	**54**	17	53	9	**82**	17	53	9
27	13	34,5	9	**55**	23,5	66,5	9	**83**	17	49,5	10
28	16	49	9	**56**	20,5	61,5	9	**84**	18,5	61	10
La placette 2											
01	31	94	9,5	**19**	26	79	10,5	**37**	18,5	54	7
02	13,5	39	7,5	**20**	24	75	10	**38**	25,5	80,5	9
03	25	79	8,5	**21**	24	75	10,5	**39**	29	86	10
04	20,5	62,5	7,5	**22**	28,5	86	10	**40**	30,5	102	10
05	20,5	59,5	9	**23**	11.5	32,5	5,5	**41**	17,5	49	8
06	12	31,5	8	**24**	11	30	7	**42**	19	59	10
07	33	99	11	**25**	22	67 ;5	10,5	**43**	25	75	9
08	21	65,5	9	**26**	22,5	72	10,5	**44**	23,5	69	9
09	24	74,5	9	**27**	25	76	11	**45**	18,5	62,5	8
10	22	69,5	9	**28**	26	76,5	11	**46**	18	51,5	8
11	25,5	81,5	10	**29**	29	60	11	**47**	26	76,5	10
12	21,5	63,5	9	**30**	37,5	103	11	**48**	22,5	65,5	9

13	26,5	81	10	**31**	17	49.5	8	**49**	31	98.5	10
14	22	66,5	10	**32**	34,5	108	11	**50**	26,5	82	9
15	31,5	89,5	10	**33**	34,5	100	11	**51**	23,5	77,5	10
16	24,5	72,5	9	**34**	16	42	7	**52**	26,5	78,5	9,5
17	24,5	74,5	9	**35**	16	50,5	7	**53**	23	70,5	9,5
18	26,5	74	10,5	**36**	13,5	39,5	7				

IV.7. Estimation de la biomasse forestière par l'utilisation des données TLS

IV.7.1. Problématique et objectifs

L'avènement de la technologie de balayage laser terrestre (TLS) a révolutionné la manière dont nous collectons des données sur la structure des arbres. Le TLS permet d'acquérir des nuages de points tridimensionnels d'une grande densité et précision, offrant ainsi une représentation détaillée et exhaustive des surfaces des arbres et de leur environnement.

Les inventaires forestiers et la recherche en écologie nécessitent des informations détaillées sur les caractéristiques des arbres. Les nuages de points 3D permettent d'estimer les attributs architecturaux et écophysiologiques tant au niveau individuel qu'au niveau des peuplements. L'analyse de ces données permet de décrire la structure des parcelles forestières, d'étudier les interactions entre les individus et d'établir des relations allométriques. La modélisation s'avère également un moyen efficace pour quantifier la distribution du matériel végétal. Ce travail a pour objectif principal d'explorer le potentiel de la technique LiDAR terrestre pour mesurer les paramètres dendrométriques des peuplements forestiers.

IV.8. Placette échantillonnage 1

Les résultats obtenus sur la première placette ont été estimés à partir d'un total de 84 arbres répartis de manière homogène sur la zone d'étude. Cette distribution uniforme des arbres sur la placette, comme indiqué dans le tableau IV.4, a permis une représentation équilibrée de la diversité végétale présente dans l'écosystème étudié.

Tableau IV.4 : Paramètres dendrométriques de la placette1 par modélisation de la placette 1

N° Arbres	Diamètres DBH (cm)	Hauteurs m	Volumes grume (m^3)	Volumes branches (m^3)
1	19,00	9,451	0,186	0,542
2	19,51	8,632	0,174	0,190
3	21,67	9,989	0,228	0,602
4	23,37	9,166	0,237	0,280
5	20,76	8,526	0,187	0,086

6	17,61	6,951	0,124	0,045
7	12,90	6,963	0,063	0,021
8	18,01	8,700	0,127	0,091
9	19,08	5,503	0,103	0,044
10	22,45	6,149	0,156	0,053
11	12,37	4,651	0,042	0,004
12	19,46	7,731	0,118	0,044
13	18,73	9,275	0,187	0,259
14	12,38	6,610	0,055	0,014
15	13,79	6,880	0,076	0,034
16	18,49	5,899	0,134	0,072
17	15,87	6,639	0,072	0,036
18	23,10	8,934	0,251	0,278
19	18,93	8,483	0,148	0,075
20	17,97	7,769	0,121	0,151
21	19,21	7,519	0,167	0,167
22	15,66	9,149	0,118	0,182
23	22,72	6,122	0,133	0,110
24	23,54	8,837	0,223	0,342
25	15,63	8,035	0,093	0,060
26	18,19	8,672	0,149	0,157
27	18,61	8,482	0,146	0,097
28	17,88	7,966	0,138	0,076
29	18,13	7,751	0,147	0,083
30	14,92	7,270	0,087	0,026
31	17,95	8,613	0,148	0,076
32	2035	7,144	0,167	0,081
33	20,98	8,296	0,159	0,190
34	21,08	7,979	0,171	0,055
35	21,81	8,919	0,198	0,232
36	17,51	7,012	0,124	0,151
37	12,90	7,144	0,058	0,042
38	11,52	7,536	0,063	0,034
39	20,49	8,632	0,161	0,145
40	17,65	8,941	0,152	0,067
41	14,60	8,858	0,080	0,098
42	17,43	9,132	0,159	0,150
43	17,21	8,874	0,138	0,109
44	16,95	8,211	0,119	0,147
45	24,74	7,829	0,205	0,215
46	16,15	6,364	0,107	0,060
47	13,87	6,018	0,072	0,011
48	13,63	6,315	0,084	0,045

49	10,79	5,841	0,039	0,004
50	17,09	6,289	0,096	0,011
51	17,12	6,333	0,097	0,029
52	18,02	5,660	0,098	0,036
53	15,20	6,771	0,077	0,013
54	13,86	5,307	0,060	0,008
55	13,48	5,417	0,044	0,011
56	10,55	7,024	0,040	0,008
57	13,01	7,323	0.,088	0,088
58	9,04	5,079	0026	0,000
59	18,03	5,973	0,123	0,053
60	16,70	7,124	0,111	0,037
61	19,75	8,957	0,205	0,204
62	14,87	8,221	0,084	0,033
63	22,74	6,798	0,191	0,063
64	15,03	8,077	0,113	0,155
65	13,74	8,461	0,094	0,108
66	14,23	5,767	0,065	0,028
67	13,60	5,404	0,086	0,084
68	18,86	8,659	0,170	0,445
69	17,58	7,291	0,155	0,210
70	14,55	6,693	0,090	0,068
71	13,84	7,321	0,088	0,059
72	12,86	6,874	0,071	0,039
73	15,81	7,302	0,108	0,062
74	12,85	7,280	0,077	0,060
75	13,03	8,866	0,089	0,017
76	17,97	8,858	0,147	0,164
77	10,65	7,185	0,045	0,041
78	14,33	7,413	0,098	0,056
79	13,98	8,020	0,077	0,047
80	14,80	8,122	0,095	0,201
81	15,04	6,308	0,098	0,057
82	17,76	8,175	0,123	0,174
83	15,00	6,382	0,095	0,049
84	17,53	8,016	0,153	0,120

L'analyse des 84 arbres a permis de capturer une variété de caractéristiques dendrométriques, telles que le diamètre à hauteur de poitrine (DBH), la hauteur, le volume de grume et le volume des branches. Cette approche exhaustive a fourni une base solide pour évaluer la santé et la

vitalité des arbres, ainsi que pour estimer leur biomasse et leur contribution à la structure globale de la canopée.

- **Diamètre (DBH) :** Cette estimation, souvent prise à une hauteur de 1,30 m du sol, est un indicateur important de la taille de l'arbre et de sa croissance. Les valeurs de DBH varient dans l'échantillon, allant de 9,0 cm à 24,7 cm.
- **Hauteur :** La hauteur de l'arbre est également une caractéristique clé pour évaluer sa croissance et son développement. Dans cet échantillon, la hauteur des arbres varie entre 4,651 m et 9,989 m.
- **Volume de grume :** Le volume de grume est la quantité de bois contenue dans le tronc de l'arbre, généralement mesurée en mètres cubes (m^3). Les volumes de grume dans cet échantillon vont de 0,026 m3 à 0,251 m^3.
- **Volume de branches :** Le volume de branches représente la quantité de bois contenue dans les branches de l'arbre, également mesurée en mètres cubes (m^3). Dans cette étude, les volumes de branches varient de 0,001 m3 à 0,602 m^3.

En examinant ces données, on peut observer des variations significatives dans les dimensions des arbres étudiés, reflétant la diversité de l'écosystème forestier. Certains arbres présentent des dimensions plus importantes, tandis que d'autres sont plus petits. Ces mesures peuvent fournir des informations précieuses sur la structure de la communauté végétale, la productivité forestière et la biodiversité de l'écosystème étudié.

IV.8.1. Validation des résultats par des arbres de référence de la placette 1

Un total de 84 arbres a été récoltés, dont 8 ont été choisi dans la validation des résultats, les mesures d'inventaire des huit arbres sont récoltées sur terrain et sont identifier dans la placette modélisée en 3D à partir des données TLS (Figure IV.25 et tableau IV.5).



Figure IV.25 : Les arbres de validation de la placette 1

Tableau IV.5 : Diamètres des arbres de validation à 1.30 (cm)

N°	Diamètres inventoriés (cm)	Diamètres estimés (cm)	Précision
1	19,00	20,44	1,44
2	19,50	19,51	0,01
3	23,50	21,67	1,83
4	23,50	23,37	0,13
5	23,00	20,76	2,24
6	18,50	17,61	0,89
7	12,50	12,90	0,40
8	18,50	18,01	0,49

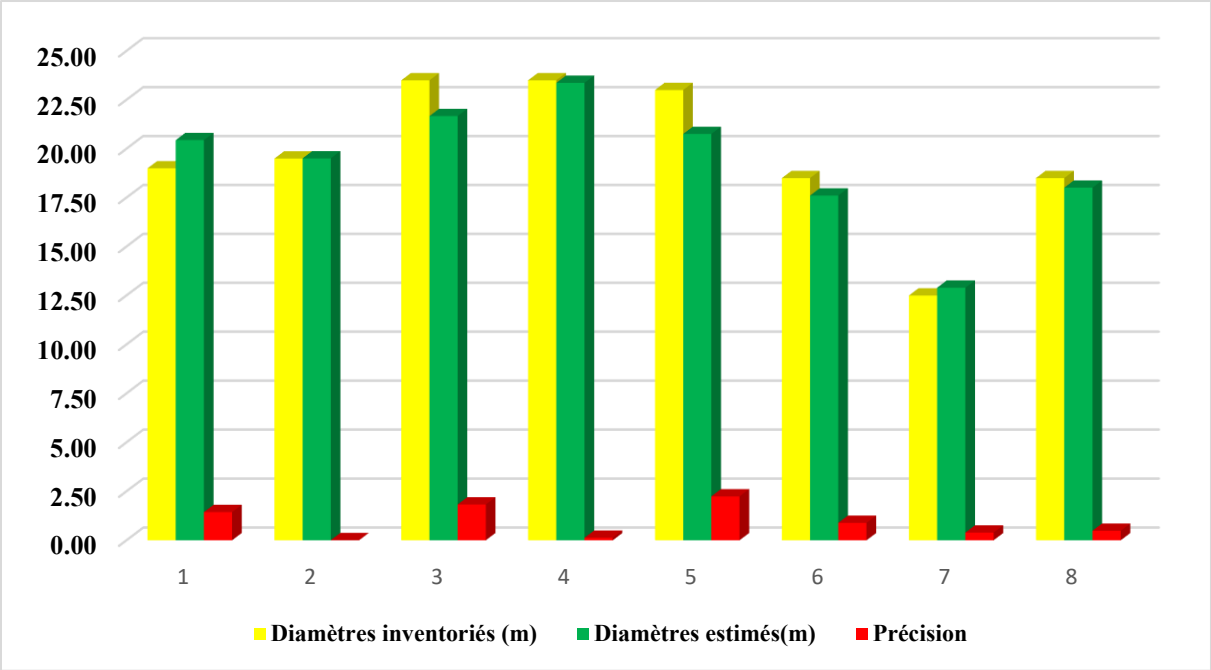


Figure IV.26 : Diamètres des arbres de validation à 1,30 (cm)

Tableau IV.6 : Les hauteurs des arbres de validations

N°	Hauteurs inventoriés (m)	Hauteurs estimés (m)	Précision (m)
1	9,000	9,451	0,450
2	9,000	8,632	0,368
3	9,500	9,989	0,488
4	10,000	9,166	0,834
5	10,000	8,526	1,474
6	9,000	6,951	2,049
7	9,000	6,963	2,037
8	9,000	8,700	0,300

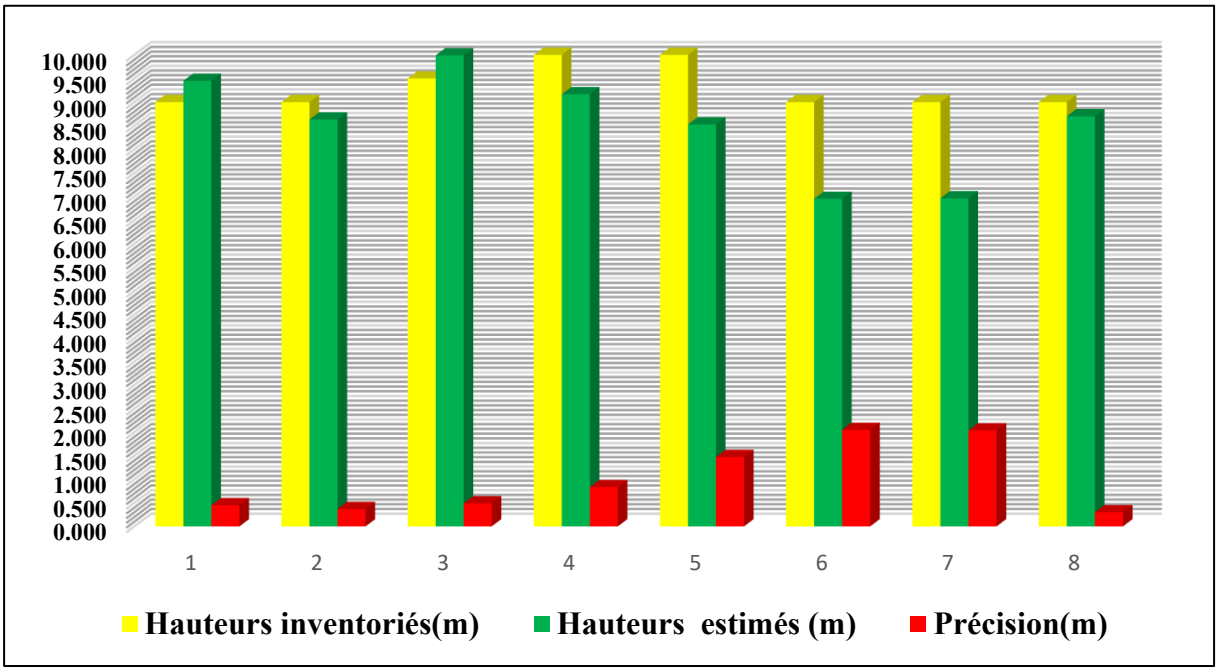


Figure IV.27 : Les hauteurs des arbres de validation

Tableau IV.7 : Volume des arbres de validation de la placette 1

Arbres inventoriés				Arbres estimés		
N°	D (m)	H (m)	Volumes (m^3)	D (m)	H (m)	Volume (m^3)
1	0,19	1,61	0,046	0,1957	1,61	0,058
2	0,195	1,43	0,043	0,1951	1,43	0,050
3	0,235	1,31	0,057	0,2167	1,31	0,054
4	0,235	1,44	0,062	0,2337	1,44	0,064
5	0,23	1,44	0,060	0,2076	1,44	0,056
6	0,185	1,43	0,038	0,1761	1,43	0,042
7	0,125	1,48	0,018	0,1290	1,48	0,023
8	0,185	1,56	0,042	0,1801	1,56	0,047
D : Diamètre DBH (1,30m) H : Hauteur						

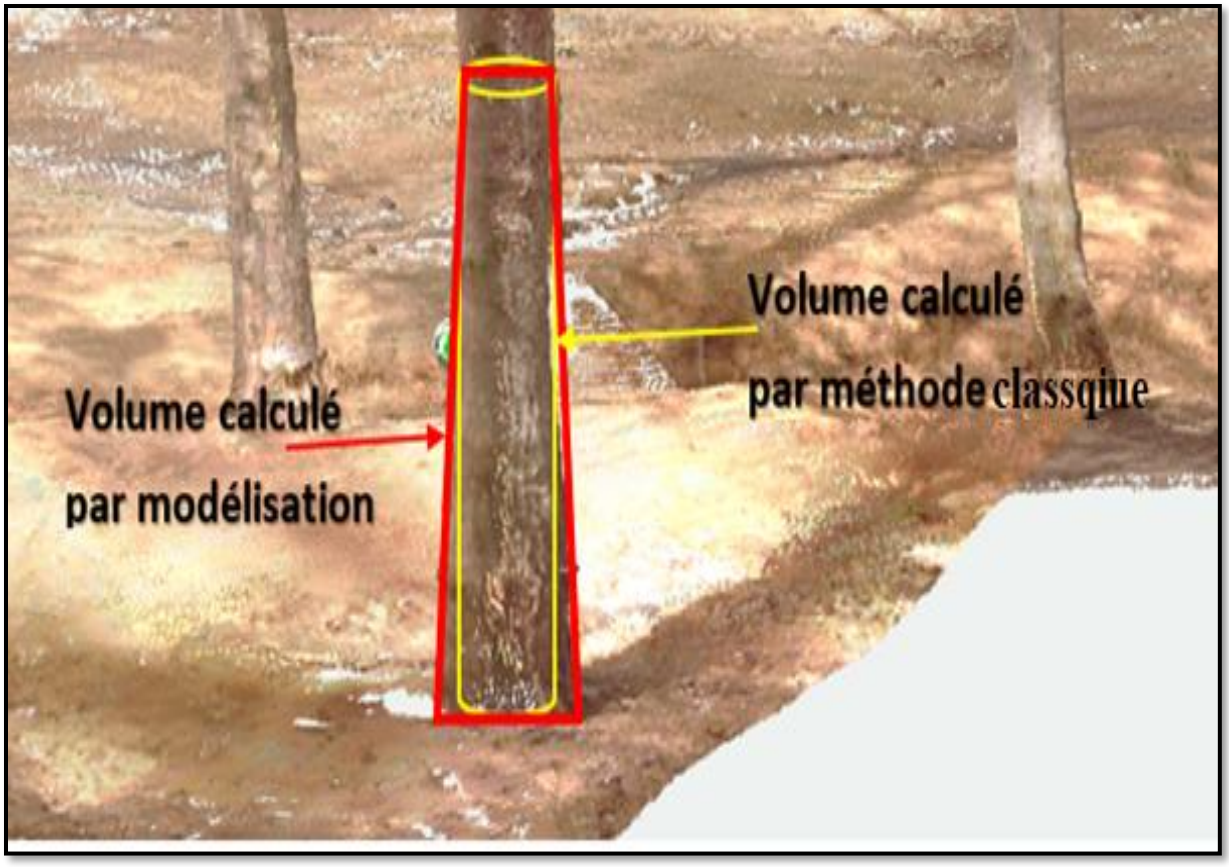


Figure IV.28 : Comparaison entre volume inventorie et estimé à 1,30m

Tableau IV.8 : Estimation de la précision du volume des arbres de validation

N°	Volumes inventoriés (m^3)	Volumes estimés (m^3)	Précision (m^3)
1	0,048	0,058	0,010
2	0,043	0,050	0,008
3	0,057	0,054	0,003
4	0,062	0,064	0,001
5	0,060	0,056	0,004
6	0,038	0,042	0,004
7	0,018	0,023	0,005
8	0,042	0,047	0,005

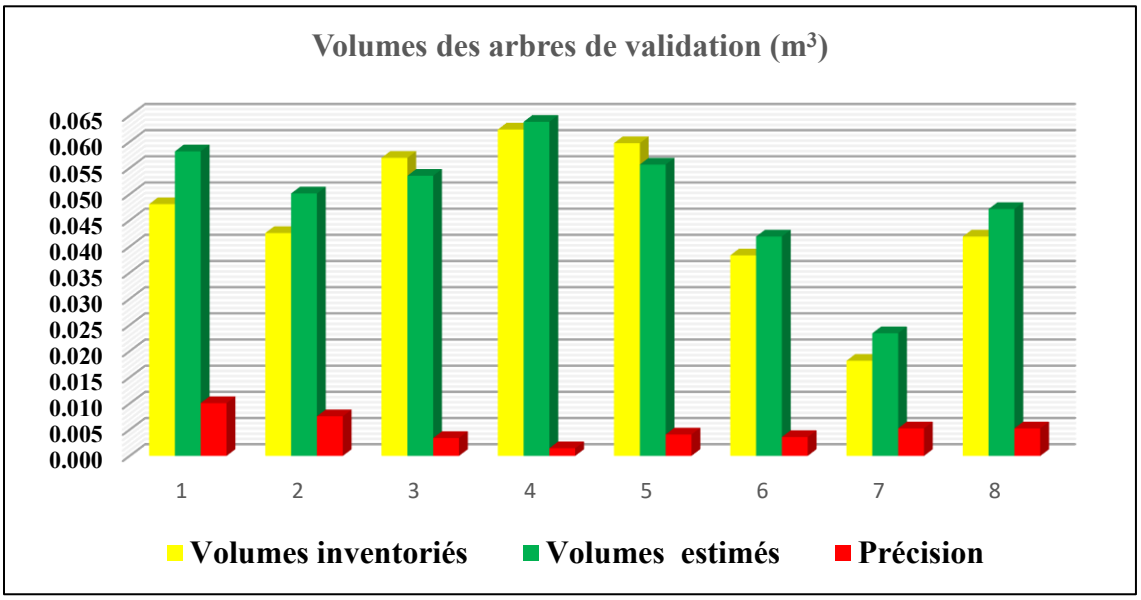


Figure IV.29 : Volumes des arbres de validation à 1,30 m

L'analyser des résultats de comparaison entre les mesures sur le terrain et les valeurs modélisées des huit arbres de validation, nous allons examiner les différences entre les deux ensembles de données pour les diamètres (DBH), les hauteurs et les volumes des arbres.

- **Diamètre des arbres de validation à 1,30 m :**

• Les valeurs de diamètre inventoriés sur le terrain varient de 12,5 cm à 23,5 cm, tandis que les valeurs estimées vont de 12,9 cm à 23,4 cm (Tableau IV.5).

• On observe généralement une légère différence entre les deux ensembles de données, avec des valeurs estimées légèrement plus élevées que les inventoriés sur le terrain. Cependant, ces différences restent généralement faibles, allant de 0,000 cm à 2,2 cm (Figure IV.26).

- **Hauteurs des arbres de validation :**

• Les hauteurs inventoriés sur le terrain varient de 9,0 m à 10,0 m, tandis que les valeurs estimées vont de 6,951 m à 9,99 m (tableau IV.6).

• Les différences entre les hauteurs inventoriés sur le terrain et les valeurs estimés sont également relativement faibles, allant de 0,3 m à 2,049 m (Figure IV.27).

- **Volumes des arbres de validation :**

• Les volumes des arbres varient de 0,018 m^3 à 0,062 m^3 pour les inventaires sur le terrain et de 0,023 m^3 à 0,064 m^3 pour les valeurs estimés à 1,30 m (Tableau IV.8).

•De manière similaire aux diamètres et aux hauteurs, les différences entre les volumes inventoriés sur le terrain et les valeurs estimés sont généralement faibles, avec des écarts allant de 0,001 m^3 à 0,010 m^3 (Figure IV.29).

En résumé, ces résultats indiquent une bonne cohérence entre les mesures effectuées sur le terrain et les valeurs estimés par modélisées. Bien qu'il y ait des différences légères entre les deux ensembles de données, celles-ci restent dans une plage acceptable, indiquant que la modélisation de la géométrie des arbres capture efficacement les caractéristiques dendrométriques des arbres étudiés.

IV.8.2. Validation des résultats de la placette 1

Les résultats de la comparaison des mesures de la placette 1 révèlent des différences entre les deux ensembles de données concernant les diamètres (DBH) et les hauteurs, ce qui permet de valider les résultats de la placette.

- **Diamètre (DBH) :**

A présent il convient d'évaluer la qualité d'estimation du diamètre sur la partie des arbres inventoriés pour lesquels un diamètre a été estimé. Dans la suite de l'analyse le terme erreur de diamètre est la différence entre le diamètre à 1,30 m estimé par modélisation et le diamètre mesuré en forêt, en gardant à l'esprit que l'erreur de mesure au ruban est d'environ +- 1cm sur le diamètre.

Sur le terrain, les diamètres inventoriés varient de 7,5 cm à 23,5 cm, avec une moyenne de 16,33 cm, tandis que les valeurs estimées s'étendent de 9.04 cm à 24.5 cm, avec une moyenne de 16,79 cm.

Globalement, une légère différence est observée entre les deux ensembles de données de la placette concernant les diamètres.

- **Hauteur :**

Les hauteurs inventoriées sur le terrain varient de 7 m à 11 m, avec une moyenne de 9,23 m, tandis que les valeurs estimées vont de 4,65 m à 9,11 m, avec une moyenne de 7,49 m.

Les différences entre les hauteurs inventoriées sur le terrain et les valeurs estimés sont également relativement faibles.

Cette approche permet une estimation précise du volume des arbres en prenant en compte leur forme réelle et en calculant avec précision les dimensions de leur tronc et de leurs branches. Contrairement aux méthodes traditionnelles qui peuvent être limitées par des approximations et des erreurs de mesure, le TLS offre une évaluation plus fine et plus précise, permettant une meilleure compréhension de la biomasse forestière et de la répartition des ressources ligneuses.

Le recours à la technique TLS permet une estimation précise du volume des arbres en exploitant leur géométrie.

IV.8.3 Analyses des résultats d'extraction de la biomasse placette 1

IV.8.3.1. Diamètre à haute de poitrine (DBH)

Répartition des diamètres des arbres de la placette 1

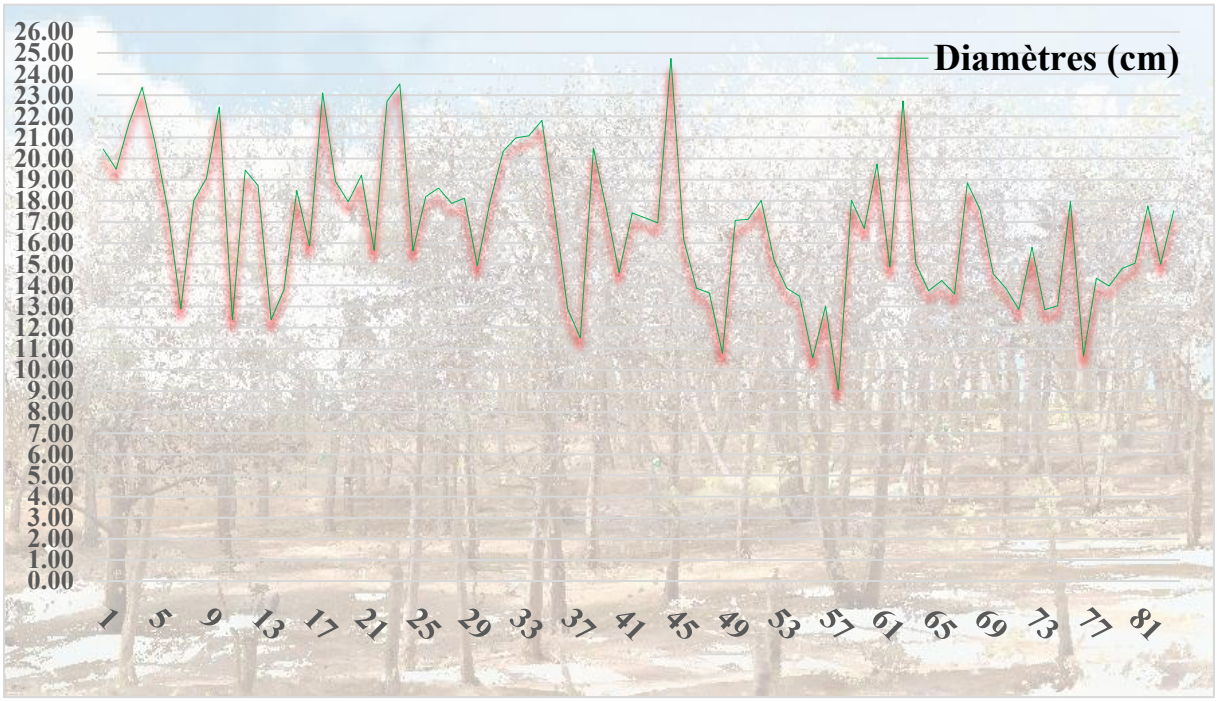


Figure IV.30 : Répartition des diamètres des arbres de la placette1

D'après les résultats, le diamètre à hauteur de poitrine (DBH) le plus petit mesuré est de 9,04 cm, tandis que le diamètre le plus grand enregistré atteint 24,74 cm. La moyenne des diamètres dans cet échantillon est de 16,79 cm. Cette placette présente 1 arbre avec un DBH variant entre 0 et 10,69 cm arbres avec un DBH variant entre 10 et 20,14 cm arbres avec un DBH variant entre 20 et 30 cm, et 0 arbres avec un DBH variant entre 30 et 40 cm (Figure IV.29).

Cette forêt est le résultat d'un reboisement effectué en 1973, et les résultats de cette placette indiquent une croissance radiale moyenne de 0,33 cm/an.

IV.8.3.2. Hauteurs totales des arbres

Répartition des Hauteurs des arbres de la placette 1

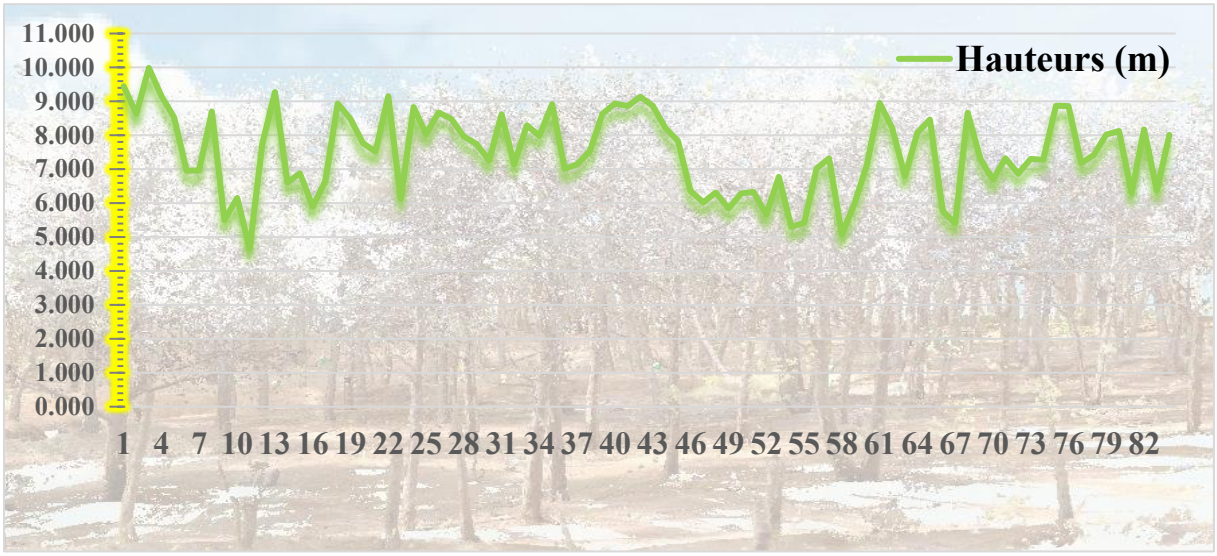


Figure IV.31 : Répartition des Hauteurs des arbres de la placette 1

IV.8.3.3. Volume des arbres

Répartition des volumes des arbres de placette 1

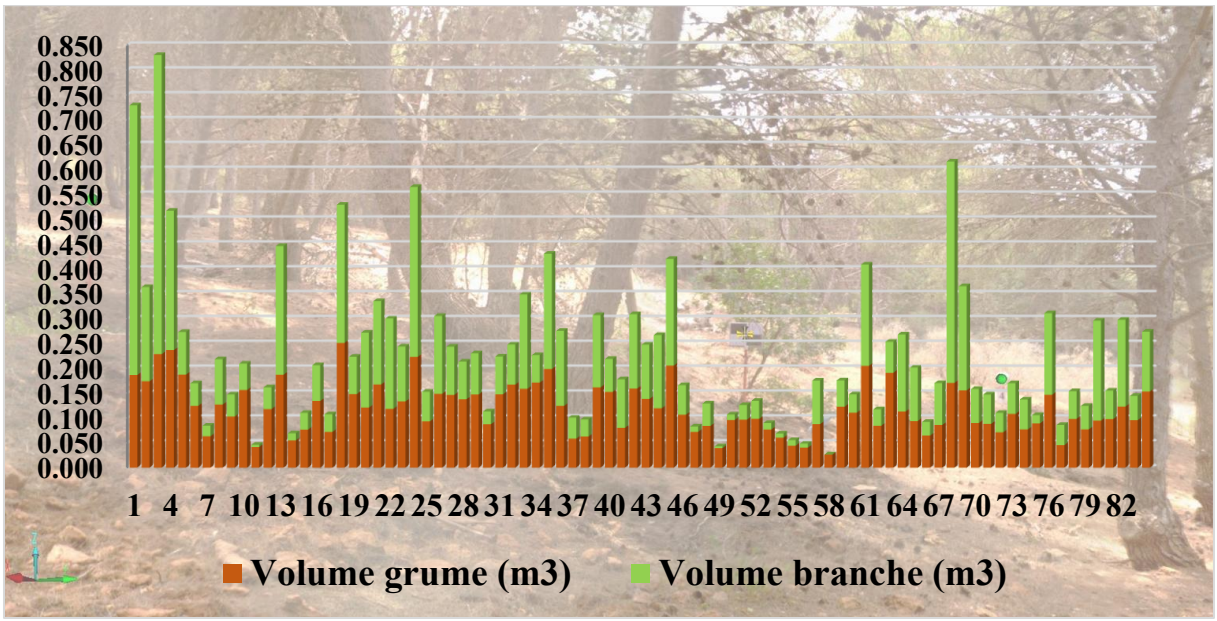


Figure IV.32 : Répartition des volumes des arbres de la placette 1

Selon les données de la télédétection par laser (TLS), le volume total des grumes s'élève à 10,07 m^3, tandis que le volume total des branches est de 9 m^3. Une observation notable dans cette placette est la présence d'arbres présentant un volume de grume important par rapport au volume des branches, comme l'arbre N° 63 avec un volume de grume de 0,198 m^3 et 0,062 m^3 pour les

branches. En revanche, l'arbre N° 3 présente un faible volume de grume, avec 0,22 m^3, mais un volume important de branches, avec 0,601 m^3 (Figure IV.32).

IV.8.3.4. La densité de la placette :

Nous l'avons évalué la densité des arbres, dans un premier temps en fonction de la surface terrière (g) à 1,30m, puis en fonction du nombre de tiges à l'hectare (Tableau IV.9).

Il ressort du tableau que la surface terrière la plus important s'observe au niveau de lag l'arbres N°45 estimé à 0,048 m^2 et la plus basse au niveau de l'arbre N° 58 estimé à 0,006 m^2, ou l'on note un totale de 1,93 m^2 par 0.1 ha soit 19,3 m^2 /ha , et nous avons recensé le nombre de tiges à l'hectare estimé à 840, et d'après (CHENOUNE, 2011) et en se basant sur la légende de la stratification/densité :

Forêt très claire : 0,10 à 05,4 m^2 /ha

Forêt claire : 05,5 à 10,4 m^2 /ha

Forêt moyennement claire : 10,5 à 15,4 m^2 /ha

Forêt dense : 15,5 à 20,4 m^2 /ha

Forêt très dense : plus de 20,5 m^2 /ha

Il s'avère que notre placette inventoriée correspond aux normes d'une forêts dense. Ces résultats justifier cette faible croissance radiale.

Tableau IV.9 : Densité de la placette par surface terrière de la placette 1

N°	*d* (1.30)	r (m)	g(1,30)	N°	d(1.30)	r (m)	g (1,30)
1	0,19	0,10	0,03	**43**	0,17	0,09	0,02
2	0,20	0,10	0,03	**44**	0,17	0,08	0,02
3	0,22	0,11	0,04	**45**	0,25	0,12	0,05
4	0,23	0,12	0,04	**46**	0,16	0,08	0,02
5	0,21	0,10	0,03	**47**	0,14	0,07	0,02
6	0,18	0,09	0,02	**48**	0,14	0,07	0,01
7	0,13	0,06	0,01	**49**	0,11	0,05	0,01
8	0,18	0,09	0,03	**50**	0,17	0,09	0,02
9	0,19	0,10	0,03	**51**	0,17	0,09	0,02
10	0,22	0,11	0,04	**52**	0,18	0,09	0,03
11	0,12	0,06	0,01	**53**	0,15	0,08	0,02
12	0,19	0,10	0,03	**54**	0,14	0,07	0,02
13	0,19	0,09	0,03	**55**	0,13	0,07	0,01
14	0,12	0,06	0,01	**56**	0,11	0,05	0,01
15	0,14	0,07	0,01	**57**	0,13	0,07	0,01
16	0,18	0,09	0,03	**58**	0,09	0,05	0,01

17	0,16	0,08	0,02	**59**	0,18	0,09	0,03
18	0,23	0,12	0,04	**60**	0,17	0,08	0,02
19	0,19	0,09	0,03	**61**	0,20	0,10	0,03
20	0,18	0,09	0,03	**62**	0,15	0,07	0,02
21	0,19	0,10	0,03	**63**	0,23	0,11	0,04
22	0,16	0,08	0,02	**64**	0,15	0,08	0,02
23	0,23	0,11	0,04	**65**	0,14	0,07	0,01
24	0,24	0,12	0,04	**66**	0,14	0,07	0,02
25	0,16	0,08	0,02	**67**	0,14	0,07	0,01
26	0,18	0,09	0,03	**68**	0,19	0,09	0,03
27	0,19	0,09	0,03	**69**	0,18	0,09	0,02
28	0,18	0,09	0,03	**70**	0,15	0,07	0,02
29	0,18	0,09	0,03	**71**	0,14	0,07	0,02
30	0,15	0,07	0,02	**72**	0,13	0,06	0,01
31	0,18	0,09	0,03	**73**	0,16	0,08	0,02
32	0,20	0,10	0,03	**74**	0,13	0,06	0,01
33	0,21	0,10	0,03	**75**	0,13	0,07	0,01
34	0,21	0,11	0,03	**76**	0,18	0,09	0,03
35	0,22	0,11	0,04	**77**	0,11	0,05	0,01
36	0,18	0,09	0,02	**78**	0,14	0,07	0,02
37	0,13	0,06	0,01	**79**	0,14	0,07	0,02
38	0,12	0,06	0,01	**80**	0,15	0,07	0,02
39	0,20	0,10	0,03	**81**	0,15	0,08	0,02
40	0,18	0,09	0,02	**82**	0,18	0,09	0,02
41	0,15	0,07	0,02	**83**	0,15	0,07	0,02
42	0,17	0,09	0,02	**84**	0,18	0,09	0,02

IV.9. Placette échantillonnage 2

Les résultats obtenus sur la deuxième placette ont été estimés à partir d'un total de 53 arbres répartis de manière homogène sur la zone d'étude. Avec un sous-bois assez dense, le tableau IV.10 a permis une représentation des arbres levés.

Tableau IV.10 : Paramètres dendrométriques de la placette1 par modélisation de la placette 2

N° Arbres	Diamètre (DBH 1,30) (cm)	Hauteur m	Volume grume (m^3)	Volume branche (m^3)
1	31	9,424	0,376	1,738
2	13	6,918	0,072	0,067
3	24	7,925	0,211	0,135
4	20	6,472	0,143	0,106
5	20	7,317	0,161	0,155
6	11	7,047	0,043	0,049
7	33	12,048	0,604	0,472
8	24	8,329	0,260	0,244
9	19	11,237	0,197	0,148

10	23	6,952	0,187	0,264
11	19	9,075	0,167	0,425
12	23	8,524	0,234	0,11
13	35	6,458	0,130	0,121
14	18	6,458	0,130	0,121
15	14	6,458	0,130	0,121
16	36	7,152	0,43	0,131
17	27	7,551	0,31	0,120
18	23	6,464	0,17	0,088
19	37	9,540	0,23	0,243
20	31	9,540	0,23	0,243
21	27	9,540	0,23	0,243
22	33	10,152	0,23	0,086
23	14	10,152	0,23	0,086
24	10	4,720	0,03	0,021
25	31	10,448	0,23	0,719
26	25	10,448	0,23	0,72
27	23	11,367	0,29	0,59
28	11	4,484	0,04	0,05
29	27	9,637	0,30	0,54
30	23	8,030	0,23	0,08
31	24	12,592	0,18	0,73
32	27	12,592	0,18	0,73
33	24	7,989	0,25	0,69
34	24	9,741	0,24	0,39
35	13	8,636	0,07	0,09
36	17	10,005	0,15	0,06
37	17	10,11	0,13	0,047
38	15.9	8,96	0,12	0,059
39	17.5	5,82	0,09	0,022
40	32.7	6,35	0,36	0,104
41	16.8	7,48	0,10	0,217
42	20.6	7,54	0,13	0,095
43	35.9	9,30	0,71	1,072
44	15.1	8,73	0,11	0,070
45	30	7,53	0,36	0,067
46	34.7	12,11	0,64	0,698
47	16.8	10,67	0,14	1,743
48	27.7	9,89	0,41	0,501
49	22.4	10,00	0,30	0,102
50	17.5	8,03	0,13	0,048
51	26.3	8,97	0,25	0,532
52	24	8,21	0,22	0,615

53	20.5	8,82	0,20	0,172

L'analyse des 53 arbres a permis de capturer une variété de caractéristiques dendrométriques, telles que le diamètre à hauteur de poitrine (DBH), la hauteur, le volume de grume, le volume des branches et densité.

- **Diamètre (DBH) :** Les diamètres à hauteur de poitrine (DBH) varient dans l'échantillon, allant de 10 cm à 37 cm. Ces valeurs sont plus élevées que celles observées dans la placette 1.
- **Hauteur :** Dans cet échantillon, la hauteur des arbres varie entre 4,484 m et 12,592 m.
- **Volume de grume :** Les volumes de grume dans cet échantillon vont de 0,03 m^3 à 0,71 m^3.
- **Volume de branches** : Dans cette placette, les volumes de branches varient de 0,021 m^3 à 1,743 m^3.

L'analyse de ces données révèle des variations significatives dans les dimensions des arbres par rapport à la première placette, ce qui s'explique par des volumes plus importants, que ce soit pour les grumes ou les branches.

IV.9.1. Validation des résultats par des arbres de référence de la placette 2

Un total de 53 arbres a été récoltés, dont 8 ont été choisi dans la validation des résultats, les mesures d'inventaire des huit arbres sont récoltées sur terrain et sont identifier dans la placette modélisée en 3D à partir des données TLS (Figure IV.32).



Figure IV.33 : Les arbres de validation de la placette 2

Tableau IV.11 : Diamètre (DBH)

N°	Diamètres inventoriés (cm)	Diamètres estimés (cm)	Précision
1	31,00	31,28	0,28
2	13,50	13,47	0,03
3	25,00	24,40	0,60
4	20,50	19,81	0,69
5	20,50	19,75	0,75
6	12,00	10,66	1,34
7	33,00	32,67	0,33
8	24,00	23,59	0,41

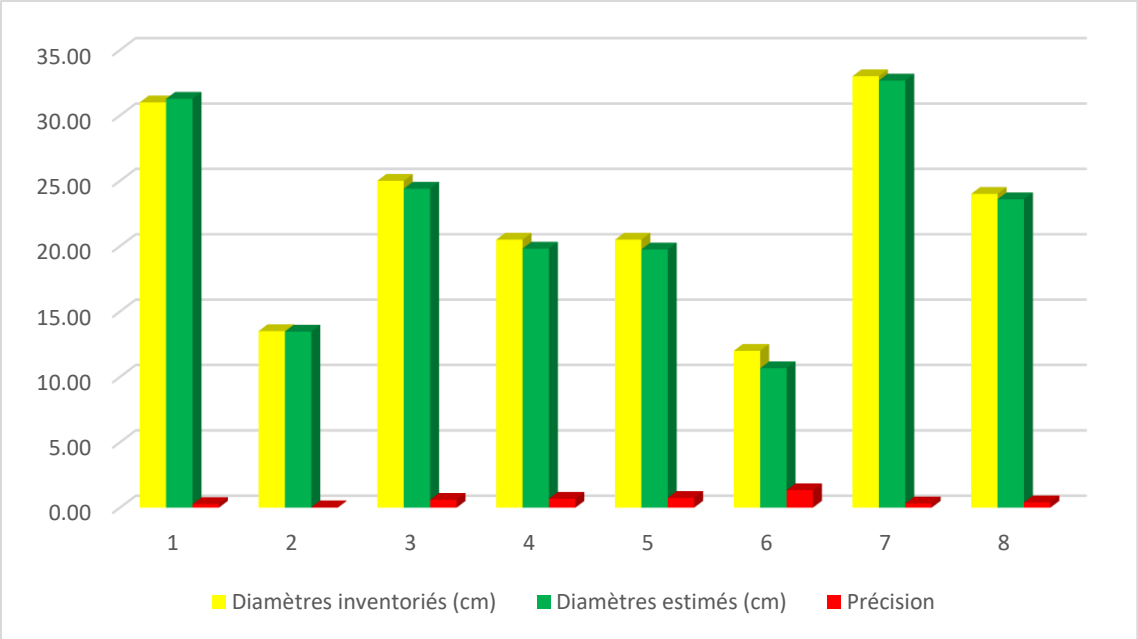


Figure IV.34 : Diamètres des arbres de validation à 1,30 (m)

Tableau IV.12 : Hauteurs

N°	Hauteurs inventoriés (m)	Hauteurs estimés (m)	Précision
1	9,500	9,424	0,08
2	7,500	6,918	0,58
3	8,500	7,925	0,58
4	7,500	6,472	1,03
5	9,000	7,317	1,68
6	8,000	7,047	0,95
7	11,000	12,048	1,04
8	9,000	8,329	0,67

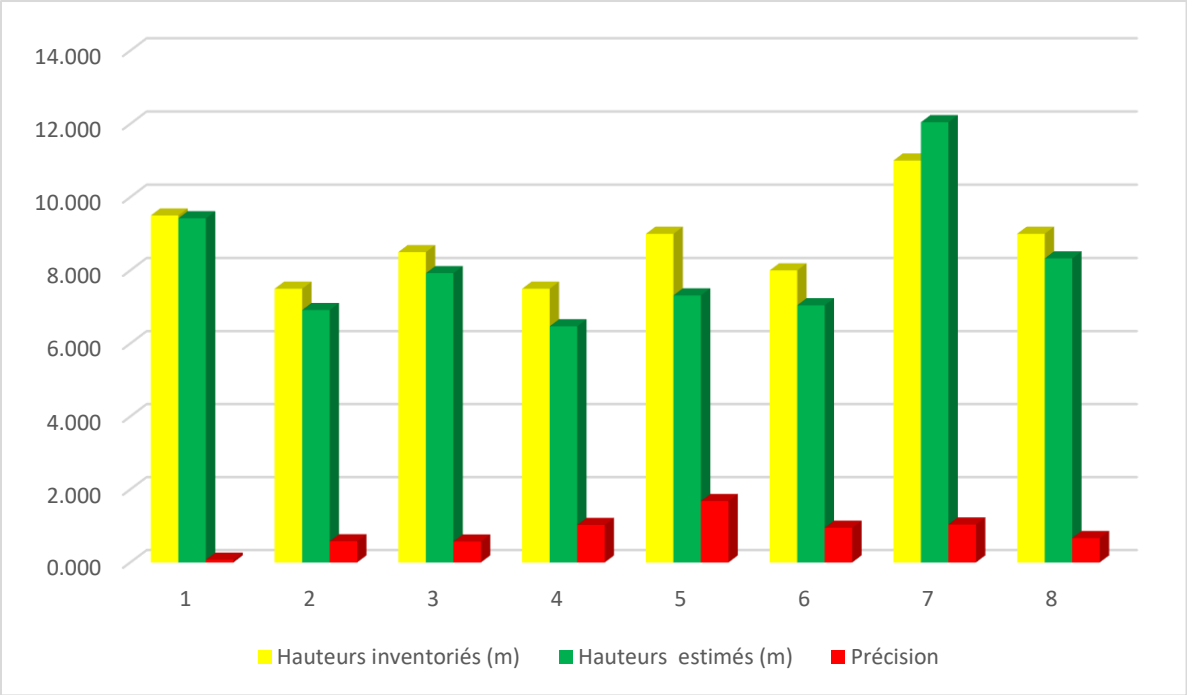


Figure IV.35 : Hauteurs des arbres de validation

Tableau IV.13 : Arbres référence de validation de la placette 2

Arbres inventoriés				Arbres estimés		
N°	D (m)	H (m)	Volumes (m^3)	D (m)	H (m)	Volume (m^3)
1	0,31	1,30	0,098	0,31	1,30	0,115
2	0,135	1,30	0,019	0,13	1,30	0,021
3	0,25	1,64	0,080	0,24	1,64	0,085
4	0,205	1,40	0,046	0,20	1,40	0,049
5	0,205	1,65	0,054	0,20	1,65	0,072
6	0,12	1,52	0,017	0,11	1,52	0,015
7	0,33	1,51	0,129	0,33	1,51	0,147
8	0,24	1,75	0,079	0,24	1,75	0,084
D : Diamètre DBH (1,30m) H : Hauteur						

Tableau IV.14 : Volumes

N°	Volumes inventoriés (m3)	Volumes estimés (m3)	Précision
1	0,098	0,115	0,016
2	0,019	0,021	0,002
3	0,080	0,085	0,005
4	0,046	0,049	0,002
5	0,054	0,072	0,018
6	0,017	0,015	0,002
7	0,129	0,147	0,018
8	0,079	0,084	0,005

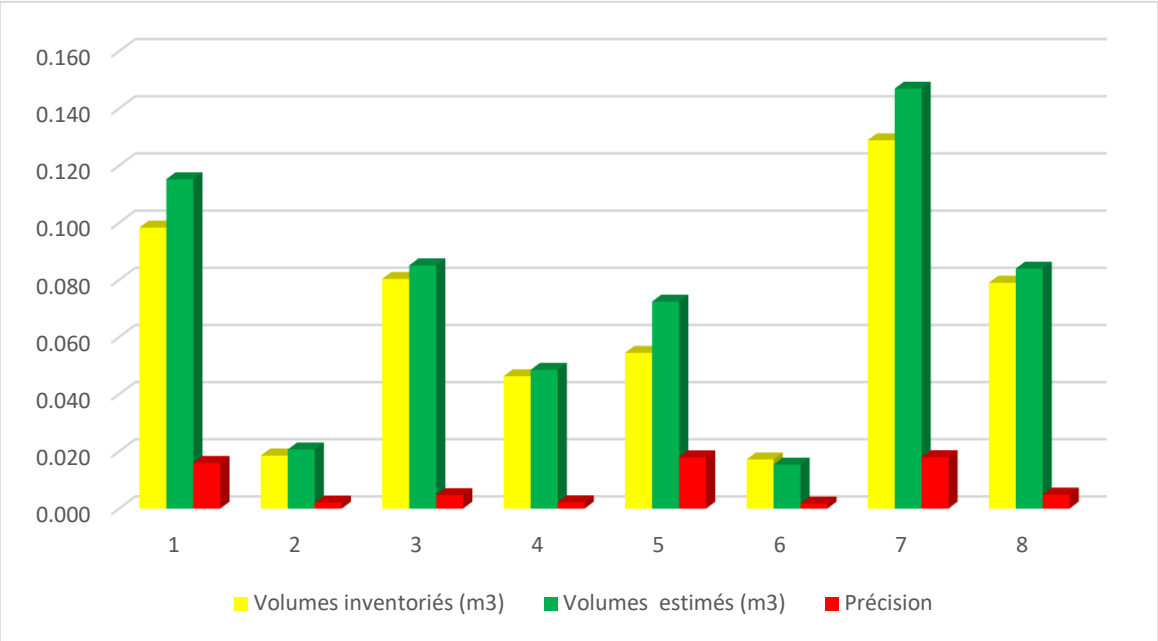


Figure IV.36 : Volumes des arbres de validation à 1,30 (m)

L'analyser des résultats de comparaison entre les mesures sur le terrain et les valeurs modélisées des huit arbres de validation, nous allons examiner les différences entre les deux ensembles de données pour les diamètres (DBH), les hauteurs et les volumes des arbres (figure IV.36).

- **Diamètre des arbres de validation à 1,30 m :**

• Les valeurs de diamètre inventoriés sur le terrain varient de 12 cm à 33 cm, tandis que les valeurs estimées vont de 10,66 cm à 32,67 cm (Tableau IV.11).

• On observe généralement une légère différence entre les deux ensembles de données, avec des valeurs estimées légèrement plus élevées que les inventoriés sur le terrain. Cependant, ces différences restent généralement faibles, allant de 0.03 cm à 1,34 cm (Figure IV.33).

- **Hauteurs des arbres de validation :**

• Les hauteurs inventoriés sur le terrain varient de 7,5 m à 11 m, tandis que les valeurs estimées vont de 6,91 m à 12,04 m (Tableau IV.12).

• Les différences entre les hauteurs inventoriés sur le terrain et les valeurs estimés sont également relativement faibles, allant de 0,08 m à 1,68 m (Figure IV.34).

- **Volumes des arbres de validation :**

• Les volumes des arbres varient de 0,017 m^3 à 0,129 m^3 pour les inventaires sur le terrain et de 0,015 m^3 à 0,14 m^3 pour les valeurs estimés à 1,30 m (Tableau IV.13 et IV.14).

• De manière similaire aux diamètres et aux hauteurs, les différences entre les volumes inventoriés sur le terrain et les valeurs estimés sont généralement faibles, avec des écarts allant de 0,002 m^3 à 0,018 m^3 (Figure IV.35).

Les résultats démontrent une concordance satisfaisante entre les mesures réalisées sur le terrain et les valeurs estimées par modélisation de la placette 2. Malgré de légères variations entre les deux ensembles de données, celles-ci demeurent dans une fourchette acceptable.

IV.9.2. Validation des résultats de placette 2

Les résultats de la comparaison des mesures de la placette 1 révèlent des différences entre les deux ensembles de données concernant les diamètres (DBH) et les hauteurs, ce qui permet de valider les résultats de la placette.

- **Diamètres (DBH) :**

Lors des relevés sur le terrain, les diamètres mesurés varient de 11 cm à 37,5 cm, avec une moyenne de 23,53 cm. En revanche, les valeurs estimées s'étendent de 10,44 cm à 37,03 cm, avec une moyenne de 23,13 cm. Dans l'ensemble, une légère disparité est constatée entre les deux ensembles de données concernant les diamètres de la placette.

- **Hauteurs :**

Les hauteurs inventoriées sur le terrain varient de 5,5 m à 11 m, avec une moyenne de 9,25 m, tandis que les valeurs estimées vont de 4,48 m à 12,59 m, avec une moyenne de 8,68 m.

Les différences entre les hauteurs inventoriées sur le terrain et les valeurs estimés sont également relativement faibles.

IV.9.3. Analyse des résultats d'extraction de la biomasse placette 2

IV.9.3.1. Diamètre à hauteur de poitrine (DBH)

Répartition des diamètres des arbres de placette 2

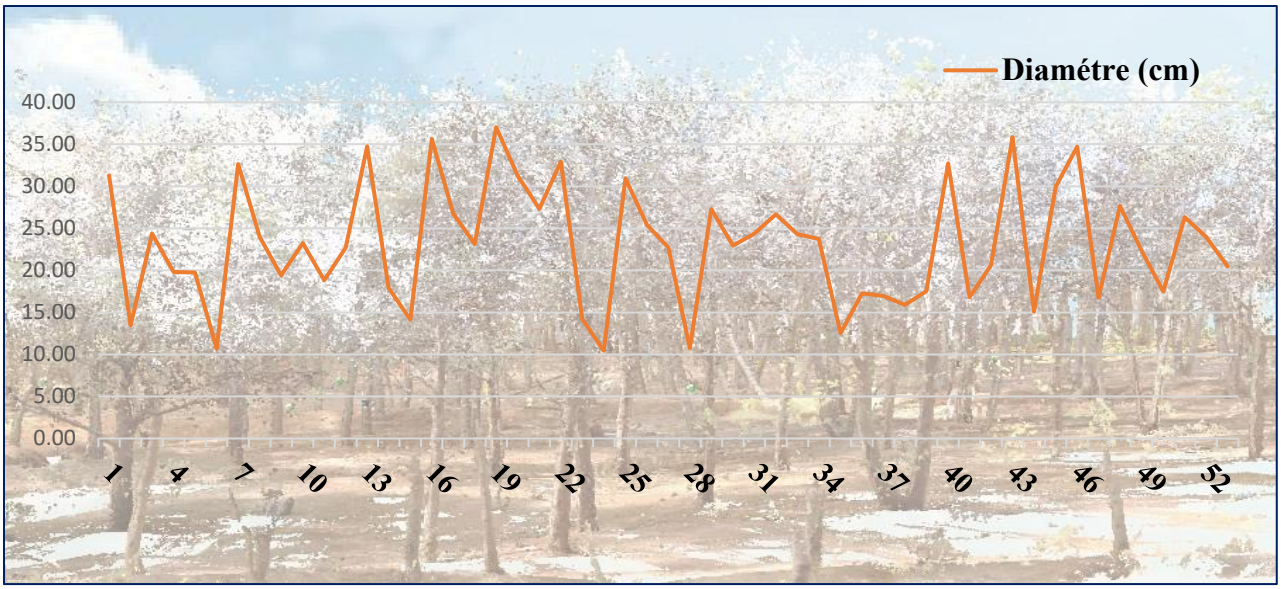


Figure IV.37 : Répartition des diamètres des arbres de la placette 2

D'après les résultats, le diamètre à hauteur de poitrine (DBH) le plus petit mesuré est de 10,44 cm, tandis que le diamètre le plus grand enregistré atteint 37,03 cm. La moyenne des diamètres dans cet échantillon est de 23,13 cm. Cette placette présente 0 arbre avec un DBH variant entre 0 et 10, 20 cm arbres avec un DBH variant entre 10 et 20 cm, 22 arbres avec un DBH variant entre 20 et 30 cm, et 11 arbres avec un DBH variant entre 30 et 40 cm (figure IV.37).

La croissance radiale de cette placette est estimée à 0,45cm/an.

IV.9.3.2. Hauteurs totales des arbres

Répartition des hauteurs des arbres de placette 2

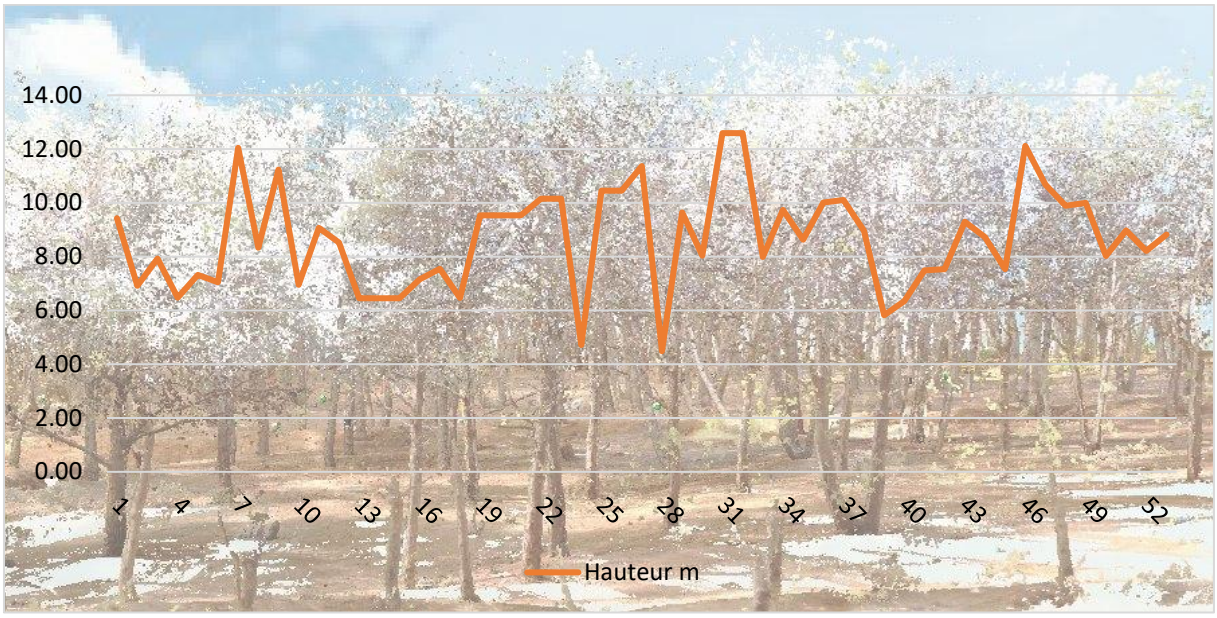


Figure IV.38 : Répartition des hauteurs des arbres de la placette 2

Selon la répartition des hauteurs observées, la plus petite mesure enregistrée est de 4,48 mètres, tandis que la plus grande atteint 12,59 mètres. En moyenne, les arbres dans cet échantillon mesurent 8,68 mètres de hauteur, avec une hauteur dominante de 12,14 mètres. Cette différence permet d'estimer une croissance annuelle moyenne de 17,01 centimètres en hauteur pour cette placette (figure IV.28).

IV.9.3.3. Volume des arbres

Répartition des volumes des arbres de la placette 2

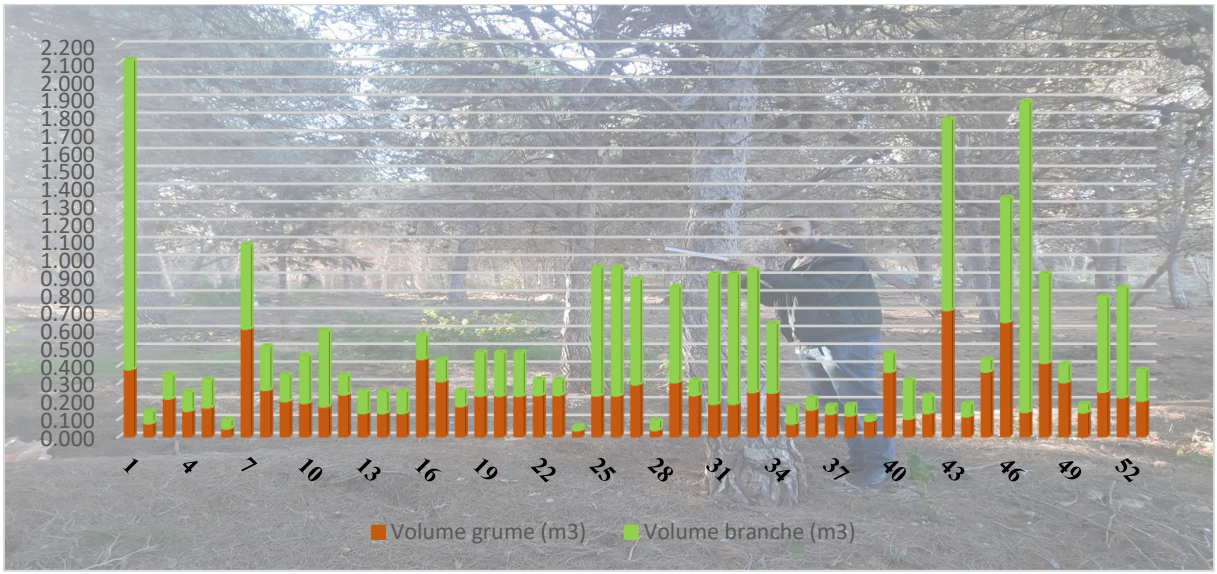


Figure IV.39 : Répartition des volumes des arbres de la placette 2

D'après l'analyse des résultats de la deuxième placette, le volume total des grumes atteint 11,92 m^3, tandis que le volume total des branches s'élève à 17,09 m^3. Contrairement à la placette 1, une observation frappante dans cette placette est la présence d'arbres avec un volume de branches significativement plus élevé par rapport au volume de grumes le cas de l'arbres N° 1 ou le volume des branches attient 1,73 m^3 tandis que le volume de la grume est de 0,376 m^3. Ces résultats suggèrent la présence d'arbres avec des houppiers volumineux par rapport à ceux de la première placette (figure IV.39).

IV.9.3.4. La densité de la placette

La densité a été évalué, dans un premier temps en fonction de la surface terrière (g) à 1.30m, puis en fonction du nombre de tiges à l'hectare (Tableau IV.15).

Il ressort du tableau que la surface terrière la plus important s'observe au niveau de l'arbres N°19 estimé à 0,107 m^2 et la plus basse au niveau de l'arbre N° 24 estimé à 0,008 m^2, ou l'on note un totale de 2,43 m^2 par 0,1 ha soit 24,3 m^2 /ha, et d'après **(Chenoune, 2011)** et en se basant sur la légende de la stratification/densité terrière, Il s'avère que notre placette inventoriée correspond aux normes d'une forêts très dense.

Nous avons comptabilisé une estimation de 530 tiges par hectare. La croissance radiale observée peut être attribuée à la faible densité des arbres dans cette placette, ce qui réduit la concurrence pour les arbres dans cet échantillon.

Tableau IV.15 : Densité de la placette par surface terrière de la placette 2

N°	*d*(1,30)	r(m)	g(m)	N°	*d*(1,30)	r(m)	*g*(m)	N°	*d*(1,30)	r(m)	*g*(m)
1	0,31	0,16	0,08	**20**	0,31	0,155	0,08	**39**	0,18	0,09	0,02
2	0,13	0,07	0,01	**21**	0,27	0,135	0,06	**40**	0,33	0,16	0,08
3	0,24	0,12	0,05	**22**	0,33	0,165	0,09	**41**	0,17	0,08	0,02
4	0,2	0,10	0,03	**23**	0,14	0,07	0,02	**42**	0,21	0,10	0,03
5	0,2	0,10	0,03	**24**	0,1	0,05	0,01	**43**	0,36	0,18	0,10
6	0,11	0,06	0,01	**25**	0,31	0,155	0,08	**44**	0,15	0,08	0,02
7	0,33	0,17	0,09	**26**	0,25	0,125	0,05	**45**	0,30	0,15	0,07
8	0,24	0,12	0,05	**27**	0,23	0,115	0,04	**46**	0,35	0,17	0,09
9	0,19	0,10	0,03	**28**	0,11	0,055	0,01	**47**	0,17	0,08	0,02
10	0,23	0,12	0,04	**29**	0,27	0,135	0,06	**48**	0,28	0,14	0,06
11	0,19	0,10	0,03	**30**	0,23	0,115	0,04	**49**	0,22	0,11	0,04
12	0,23	0,12	0,04	**31**	0,24	0,12	0,05	**50**	0,18	0,09	0,02
13	0,35	0,18	0,10	**32**	0,27	0,135	0,06	**51**	0,26	0,13	0,05
14	0,18	0,09	0,03	**33**	0,24	0,12	0,05	**52**	0,24	0,12	0,05
15	0,14	0,07	0,02	**34**	0,24	0,12	0,05	**53**	0,21	0,10	0,03
16	0,36	0,18	0,10	**35**	0,13	0,065	0,01				
17	0,27	0,14	0,06	**36**	0,17	0,085	0,02				
18	0,23	0,12	0,04	**37**	0,17	0,085	0,02				
19	0,37	0,19	0,11	**38**	0,159	0,0795	0,02				

En conclusion, les résultats obtenus montrent que les erreurs de numérisation des nuages de points demeurent globalement faibles, ce qui témoigne de la qualité des données acquises par le scanner laser terrestre (TLS). Les erreurs moyennes et maximales enregistrées restent limitées, tandis que le niveau de chevauchement entre les stations de numérisation est satisfaisant, garantissant une représentation fidèle et précise de la structure des peuplements forestiers. Par ailleurs, les méthodes de consolidation des scans, reposant notamment sur l'utilisation de sphères de référence et de damiers, ont démontré leur efficacité en permettant la production de nuages de points cohérents, précis et fiables, parfaitement adaptés à la modélisation tridimensionnelle des parcelles forestières.

Les résultats obtenus confirment également la capacité du TLS à estimer avec une grande précision les principaux paramètres dendrométriques, en particulier le diamètre à hauteur de poitrine (DHP), la hauteur des arbres, le volume des tiges ainsi que les surfaces terrières. Ces paramètres constituent des indicateurs essentiels pour l'estimation de la biomasse aérienne et du stock de carbone forestier, deux éléments fondamentaux dans le contexte actuel de la lutte contre le changement climatique et de la gestion durable des écosystèmes forestiers.

L'ensemble des travaux réalisés met en évidence que le TLS, lorsqu'il est mis en œuvre selon une méthodologie rigoureuse, constitue une alternative performante aux méthodes classiques d'inventaire forestier. Il offre une acquisition rapide, non destructive et hautement précise des données dendrométriques, tout en améliorant la représentativité des mesures et en réduisant les incertitudes liées aux relevés de terrain. Ces performances font du TLS un outil particulièrement adapté à l'analyse de la structure des peuplements, à l'estimation de la biomasse forestière, au suivi des ressources forestières et à la préservation de la biodiversité.

Conclusion générale

Au terme de ce travail, il ressort que l'intégration des technologies TLS dans estimation de la biomasse des peuplements forestiers constitue une avancée significative pour l'amélioration des méthodes d'inventaire et d'analyse dendrométrique. En effet, contrairement aux approches traditionnelles, souvent limitées par des contraintes opérationnelles, temporelles et humaines, le TLS permet l'acquisition de données tridimensionnelles à haute résolution, offrant ainsi une description fine et objective de la structure des arbres.

Le LiDAR terrestre se révèle être une technologie clé dans le domaine de l'inventaire et de la gestion forestiers, permettant d'optimiser les pratiques de gestion et de promouvoir une utilisation durable des ressources naturelles, tout en favorisant la conservation des forêts et leur contribution à la biodiversité globale.

Le LiDAR terrestre présente plusieurs avantages majeurs par rapport aux méthodes manuelles traditionnelles. Premièrement, sa rapidité d'acquisition des données permet d'examiner des zones forestières étendues en un laps de temps réduit, augmentant ainsi l'efficacité du travail de terrain. Deuxièmement, il offre une précision accrue en capturant des détails difficiles à obtenir avec les méthodes classiques, tels que la structure complète des arbres et leur interaction avec l'écosystème environnant. Troisièmement, les données générées peuvent être transformées en modèles 3D détaillés, offrant ainsi une visualisation et une analyse plus approfondies des structures arborescentes et permettant de suivre plus précisément l'évolution de la croissance des arbres.

Les résultats obtenus dans ce travail confirment la valeur du TLS en tant qu'outil primordial pour la gestion forestière. Non seulement il fournit des informations détaillées et précises sur la structure des arbres, mais il peut également soutenir les gestionnaires forestiers dans la prise de décisions stratégiques. En facilitant la détection précoce des changements dans la santé des arbres et en améliorant la planification des pratiques de gestion, cette technologie contribue de manière significative à la durabilité des écosystèmes forestiers.

En définitive, cette étude confirme le potentiel considérable du TLS en tant qu'outil de référence pour l'étude des écosystèmes forestiers, tout en ouvrant la voie à de futures recherches visant à améliorer les méthodes d'estimation de la biomasse et du carbone forestier

Références bibliographiques :

- **Aidoud, A. (1997)**. Fonctionnement des écosystèmes méditerranéens. *académie de Toulouse*.
- **Aimé, S. (1991).** *Etude écologique de la transition entre les bioclimats subhumide, semi-aride et aride dans l'étage thermo-méditerranéen du tell oranais (Algérie occidentale)*.
- **Alcaraz C., 1982-** La végétation de l'ouest algérien. Thèse d'état : Univ. Perpignan, 415 p. Carte de la végétation de l'Algérie septentrional (1/500.000).
- **Aschoff, T., & Spiecker, H. (2004).** Algorithms for the automatic detection of trees in laser scanner data. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *36*(Part 8), W2.
- **Astrup, R., Ducey, M. J., Granhus, A., Ritter, T., & von Lüpke, N. (2014).** Approaches for estimating stand-level volume using terrestrial laser scanning in a single-scan mode. *Canadian Journal of Forest Research*, *44*(6), 666-676.
- **Będkowski, K. (2004)**. Skanowanie laserowe i jego zastosowanie w leśnictwie. *Roczniki Geomatyki-Annals of Geomatics*, *2*(4), 33-40.
- **Benabadji, N., & Bouazza, M. (2000).** Quelques modifications climatiques intervenues dans le Sud-Ouest de l'Oranie (Algérie Occidentale). *Journal of Renewable Energies*, *3*(2), 117-125.
- **Boehler, W., Vicent, M. B., & Marbs, A. (2003).** Investigating laser scanner accuracy. *The international archives of photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*, *34*(Part 5), 696-701.
- **Brolly, G., & Kiraly, G. (2009)**. Algorithms for stem mapping by means of terrestrial laser scanning. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica*, *5*, 119-130.

- **Chenoune, K. (2011).** *Etude de la relation entre la circonférence et la hauteur; et entre la circonférence, la hauteur et l'espacement des arbres* [PhD Thesis]. http://dspace.ensa.dz:8080/jspui/handle/123456789/168
- **Chirrek, M., Strzeliński, P., Wencel, A., Zasada, M., & Zawi\la-Niedźwiecki, T. (2007).** Wykorzystanie technologii naziemnego skaningu laserowego w inwentaryzacji lasu. *Roczniki Geomatyki-Annals of Geomatics*, *5*(5), 19-24.
- **Chmielewski, L. J., Bator, M., Zasada, M., Stereńczak, K., & Strzeliński, P. (2010).** Fuzzy Hough transform-based methods for extraction and measurements of single trees in large-volume 3D terrestrial LIDAR data. *Computer Vision and Graphics: International Conference, ICCVG 2010, Warsaw, Poland, September 20-22, 2010, Proceedings, Part I*, 265-274.
- **Daget, P. (1977).** Le bioclimat méditerranéen : Caractères généraux, modes de caractérisation. *Vegetatio*, *34*(1), 1-20.
- **Debrach, J. (1953).** *Notes sur les climats du Maroc occidental*. Institut Scientifique Chérifien.
- **Di Castri, F., Hansen, A. J., & Debussche, M. (1990).** *Biological invasions in Europe and the Mediterranean Basin* (Vol. 65). Springer Science & Business Media.
- **D.P.S.B, (2011) :** Annuaire statistique de la wilaya de Ain Temouchent Année 2010.Direction de la programmation et suivi budgetaire.132p.
- **Dresch, J. (1960).** Remarques sur les sols rouges méditerranéens et leur évolution géomorphologique. Actes du Congrès International de Géographie, ou Annales de Géographie, Paris
- **Duchauffour, P. H. (1983).** *Sols salsodiques*. Pédologie., New York. *biol*, *31*(5-6), 249-255.
- **Durand, J. (1958).** Les sols rouges et les croûtes calcaires en Algérie. Revue de Géographie Physique et de Géologie Dynamique, Vol. 2, Fasc. 1, pp. 39-55
- **Emberger, L. (1955).** Projet d'une classification biogéographique des climats. *Ann.*

- **Gaussen, H., & Bagnouls, F. (1953).** Saison sèche et indice xérothermique. *Toulouse, França: Université de Toulouse, Facultei dês Sciences*.
- **Hackenberg, J., Morhart, C., Sheppard, J., Spiecker, H., & Disney, M. (2014).** Highly accurate tree models derived from terrestrial laser scan data : A method description. *Forests*, *5*(5), 1069-1105.
- **Hackenberg, J., Spiecker, H., Calders, K., Disney, M., & Raumonen, P. (2015).** SimpleTree—An efficient open source tool to build tree models from TLS clouds. *Forests*, *6*(11), 4245-4294.
- **Hackenberg, J., Wassenberg, M., Spiecker, H., & Sun, D. (2015).** Non destructive method for biomass prediction combining TLS derived tree volume and wood density. *Forests*, *6*(4), 1274-1300.
- **Halitim, A. (1985).** Sols des régions arides d'Algérie. Thèse de Doctorat d'État, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, 384 p. (Réédité par l'Office des Publications Universitaires - OPU, Alger)
- **Henning, J. G., & Radtke, P. J. (2006).** Detailed stem measurements of standing trees from ground-based scanning lidar. *Forest Science*, *52*(1), 67-80.
- **Hoyer, G. E. (1985).** *Tree form quotients as variables in volume estimation* (Vol. 345). US Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Forest and ….
- **Jean, Y. M. (2005).** *Foresterie*.
- **Kangas, A., Astrup, R., Breidenbach, J., Fridman, J., Gobakken, T., Korhonen, K. T., Maltamo, M., Nilsson, M., Nord-Larsen, T., & Næsset, E. (2018).** Remote sensing and forest inventories in Nordic countries–roadmap for the future. *Scandinavian Journal of Forest Research*, *33*(4), 397-412.
- **Liang, X., Kankare, V., Hyyppä, J., Wang, Y., Kukko, A., Haggrén, H., Yu, X., Kaartinen, H., Jaakkola, A., & Guan, F. (2016).** Terrestrial laser scanning in forest inventories. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *115*, 63-77.

- **Liang, X., Kankare, V., Yu, X., Hyyppä, J., & Holopainen, M. (2013).** Automated stem curve measurement using terrestrial laser scanning. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *52*(3), 1739-1748.
- **Maas, H.-G., Bienert, A., Scheller, S., & Keane, E. (2008).** Automatic forest inventory parameter determination from terrestrial laser scanner data. *International journal of remote sensing*, *29*(5), 1579-1593.
- **Næsset, E. (2002).** Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two-stage procedure and field data. *Remote sensing of environment*, *80*(1), 88-99.
- **Palm, R. (1982).** Influence de la formule de cubage et de la longueur des billons sur la détermination du volume des arbres abattus. *Annales des sciences forestières*, *39*(3), 231-238.
- **Pfeifer, N., & Briese, C. (2007).** Geometrical aspects of airborne laser scanning and terrestrial laser scanning. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *36*(3/W52), 311-319.
- **Quézel, P. (2000)**. *Réflexions sur l'évolution de la flore et de la végétation au Maghreb méditerranéen* (Vol. 1). Ibis Press Paris.
- **Rondeux, J. (1993).** *La mesure des arbres et des peuplements*. Presses agronomiques de Gembloux, 521p.
- **Rusu, R. B., & Cousins, S. (2011).** 3d is here : Point cloud library (pcl). *2011 IEEE international conference on robotics and automation*, 1-4. https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5980567/
- **Seltzer, P. (1946)**. le climat de l'Algérie. 219 pp. *Alger, La Typo-litho" & J. Carbonel*.

- **Sighomnou, D. (2004).** Analyse et redéfinition des régimes climatiques et hydrologiques du Cameroun : Perspectives d'évolution des ressources en eau. *These doct Etat Univ Yaoundé I, Cameroun*.
- **Simonneau, P. (1961).** Observations sur la végétation et les sols de certains groupements en Algérie occidentale. Direction de l'Hydraulique et de l'Équipement Rural, Service des Études Scientifiques, Alger.
- **Sterenczak, K., Lisanczuk, M., Parkitna, K., Mitelsztedt, K., Mroczek, P., & Misnicki, S. (2018).** The influence of number and size of sample plots on modelling growing stock volume based on airborne laser scanning. *Drewno. Prace Naukowe. Doniesienia. Komunikaty*, *61*(201).
- **Tanaka, T., Yamaguchi, J., & Takeda, Y. (1998).** Measurement of forest canopy structure with a laser plane range-finding method–development of a measurement system and applications to real forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, *91*(3-4), 149-160.
- **Tompalski, P. (2009).** Naziemny skaning laserowy w inwentaryzacji zieleni miejskiej na przyk\ladzie Plant w Krakowie. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, *20*, 421-431.
- **Wężyk, P. (2006).** Wprowadzenie do technologii skaningu laserowego w leśnictwie. *Roczniki Geomatyki-Annals of Geomatics*, *4*(4), 119-132.
- **Wezyk, P., Koziol, K., Glista, M., & Pierzchalski, M. (2007).** Terrestrial laser scanning versus traditional forest inventory first results from the polish forests. *ISPRS workshop on laser scanning*, 12-14.
- **Wężyk, P., Szostak, M., Zięba, K., Rysiak, P., Hawry\lo, P., & Ratajczak, M. (2015).** Preliminary results of the monumental tree monitoring based on terrestrial laser scanning-a case study of the Oak Bartek in Zagnańsk (Poland). *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, *27*.

- **White, J. C., Coops, N. C., Wulder, M. A., Vastaranta, M., Hilker, T., & Tompalski, P. (2016).** Remote sensing technologies for enhancing forest inventories : A review. *Canadian Journal of Remote Sensing*, *42*(5), 619-641.
- **White, J. C., Wulder, M. A., Varhola, A., Vastaranta, M., Coops, N. C., Cook, B. D., Pitt, D., & Woods, M. (2013).** A best practices guide for generating forest inventory attributes from airborne laser scanning data using an area-based approach. *The Forestry Chronicle*, *89*(6), 722-723.
- **Zasada, M., & Sterenczak, K. (2013).** Dok\ladność określania wybranych parametrów rozk\ladów pierśnic drzew w drzewostanach sosnowych za pomocą naziemnego skanowania laserowego. *sylwan*, *157*(12), 883-891.
- **Zawila-Niedzwiecki, T., Sterenczak, K., Balazy, R., Wencel, A., Strzelinski, P., & Zasada, M. (2008).** The use of terrestrial and airborne LIDAR technology in forest inventory Aubl. Em Minas Gerais, Brasil O uso da tecnologia LIDAR aerotransportado e terrestre no inventário florestal. *AMBIÊNCIA*, *4*(4), 57-68.