



Mémoire

*En vue de l'obtention du diplôme de Magister
en Sciences Agronomiques*

Option : Ecologie, diversité et dynamique des espèces et des communautés forestières

Thème

**Analyse inter-stationnelle et interindividuelle de la morphologie
des feuilles d'Erables (*Acer monspessulanum* L. et *Acer
obtusatum* W. et K.) au Djurdjura**

Présentée par : CHIKHAOUI Zakia

Devant le jury :

Présidente : Mlle KROUCHI Fazia

Maitres de conférences classe « A » UMMTO

Encadreur : Mr DERRIDJ Arezki

Professeur UMMTO

Examineur : Mr MESSAOUDENE Mahand

Directeur de recherche INRF Azazga

Examineur : Mr AIT-SAID Samir

Maitre de conférences classe « A » UMMTO

Examinatrice : Mme BOURBIA-MOUAS Sophia

Maitre de conférences classe «B» UMMTO

Remerciements

Je ne remercierai jamais assez Mr DERRIDJ Arezki, Professeur et Doyen de la faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques d'avoir accepté de diriger ce travail malgré ses nombreuses occupations administratives. Ses conseils et orientations m'ont été d'une aide inestimable, qu'il retrouve ici toute ma gratitude.

Je remercie chaleureusement Mlle KROUCHI Fazia Maitre de conférences « A » à l'UMMTO pour avoir accepté de présider le jury. Ses conseils et orientations tout au long de ma post graduation m'ont été précieux, qu'elle retrouve ici toute ma reconnaissance.

J'adresse mes remerciement également à Mr MESSAOUDENE Mahand, Directeur de recherche à l'INRF d'Azazga pour avoir accepté d'examiner ce travail. Je suis honoré par sa présence parmi les membres du jury.

Merci à Mr AIT SAID Samir, Maitre de conférences « A » à l'UMMTO et Mme BOURBIA-MOUAS Sophia Maitre de conférence « B » d'avoir accepté d'examiner ce travail, je leur en suis profondément reconnaissante.

Je remercie également Dr CARDINI Andrea chercheur en Biologie Animale à l'Université de Modène et de Reggio d'Émilie en Italie, pour sa disponibilité, la documentation qu'il m'a suggérée sur la morphométrie géométrique et tous ses conseils, je lui en suis profondément reconnaissante.

Je n'oublierai pas de remercier Mr. Lateb Mustapha, les nombreuses discussions que nous avons eues m'ont été d'une aide précieuse essentiellement à l'utilisation des logiciels de morphométrie géométrique utilisé dans ce travail. Merci à BOUAHMED Abdelkader pour toute sa disponibilité et son aide et pour toute la documentation qu'il m'a fourni.

Mes remerciement vont également à Mr. MERIBAI Youcef Directeur du Parc National du Djurdjura, à Mr MAHDI Abdelaziz chef du secteur de Tala Guilef et à tous les forestiers pour leurs disponibilité lors des nombreuses sorties sur le terrain.

Mes vifs remerciements vont aussi à tous mes amis et camarade de Post Graduation Hayat, Zahira, Fatma, Fazia, Ahmed et tous les collègues du labo de Biosystématique Végétal pour les agréables moments qu'on a passé ensemble et pour leur soutien et leur encouragement dans les moments de doutes.

Je voudrai remercier ma famille pour son soutien sans faille, sa patience et sa compréhension dans les moments les plus difficiles de cette aventure. Merci encore une fois.

Liste des figures

Figure 1 : Aire de distribution géographique du genre <i>Acer</i> L. (TANAI, 1978)	05
Figure 2 : Aire de distribution du genre <i>Acer</i> en Afrique du Nord (Quezel et Santa, 1963).....	06
Figure3 : Illustration de quelques mesures de distances et angles sur une feuille d' <i>Acer rubrum</i> (Jensen <i>et al.</i> , 2002).....	9
Figure 4 : La taille de centroïde (Zelditch <i>et al.</i> , 2012).....	10
Figure5 : Les trois opérations qui n'affectent pas la conformation (Zelditch <i>et al.</i> , 2012).....	11
Figure6 : Relation entre l'espace des triangles de Kendall, l'espace des conformations formalisés après les superpositions Procrustes (« shape space») et l'espace tangent à l'espace de conformations (Cucchi <i>et al.</i> , 2015)	11
Figure 7 : Les étapes des superpositions de Procruste (Mitteroecker <i>et al.</i> , 2013).....	15
Figure 8 : Moyens de visualisation des différences de conformation : A. Par les vecteurs de déplacement des PR; B. Par les Splines en plaque mince (Zelditch <i>et al.</i> , 2012).....	16
Figure9 : Grille de déformation de D'ArcyThompson's (1917) montrant les changements de conformation entre le Diodon et le poisson lune Mola (in Cucchi <i>et al.</i> , 2015)	17
Figure10 : Localisation des stations échantillonnées sur une photo de Google Earth	18
Figure11 : Quelques photos de la station d'Azrou N'Thor	19
Figure 12 : Quelques photos du site Djamaa Adharchi.....	20
Figure 13 : Quelques photos d' <i>Acer obtusatum</i>	21
Figure14 : Quelques photos de la station de Taouialt	22
Figure15 : Quelques photos d' <i>A. monspessulanum</i> dans la station de Tigounatine	23
Figure16 : Rameau de l'année d' <i>Acer monspessulanum</i>	24
Figure 17 : Paramètres mesurés sur les feuilles d' <i>Acer monspessulanum</i>	25
Figure 18 : Paramètres mesurés sur les feuilles d' <i>Acer obtusatum</i>	26
Figure 19 : Organisation des dossiers.....	27
Figure 20 : Les étapes de création d'un fichier « tps » avec le logiciel TpsUtil	27
Figure 21 : Aperçu d'un fichier « .tps » crée.....	29
Figure 22 : Interface graphique du logiciel tpsDig2.....	29

Figure23 : Boite à moustache montrant la variabilité de quelques paramètre et ratios selon le niveau d'insertion des feuilles et de la station.	34
Figure 24 : Illustration des caractères foliaires selon quelques arbres	35
Figure25 : Courbe de régression entre l'espace de Kendall et l'espace tangent	36
Figure26 : Diagramme de distribution cumulative des distances des échantillons individuels et de la forme moyenne de l'échantillon complet	36
Figure27 : Résultat de la superposition de Procruste.	37
Figure 28 : Pourcentage de variation des axes en composantes principales.	38
Figure29 : Projection des individus et des niveaux d'insertion des feuilles selon les deux premières composantes principales.	40
Figure 30 : Projection des individus et des niveaux d'insertion des feuilles selon la première et la troisième composante principale.	41
Figure31 : Projection des individus et des niveaux d'insertion des feuilles dans le plan 1-3 et mise en évidence des arbres selon les stations	42
Figure32 : Projection des individus dans le plan 1-3 et mise en évidence des arbres selon les stations et le niveau d'insertion des feuilles sur le rameau	43
Figure 33 : Visualisation du changement de conformation de la feuille selon le premier axe..	44
Figure 34 : Visualisation du changement de conformation de la feuille selon le deuxième axe	45
Figure 35 : Visualisation du changement de conformation de la feuille selon le troisième axe	46
Figure36 : Courbe de régression entre l'espace de Kendall et l'espace tangent	46
Figure 37 : Diagramme de distribution cumulative des distances des échantillons individuels et de la forme moyenne de l'échantillon complet.	47
Figure38 : Résultat de la superposition de Procruste	47
Figure39 : Variation de la conformation de toutes les observations et leurs répliques.....	49
Figure 40 : Pourcentage de variation des axes en composantes principales	49
Figure 41 : Projection des individus selon les deux premières composantes principales	51
Figure42 : Projection des individus selon la première et la troisième composante principale.	52
Figure43 : Visualisation du changement de conformation de la feuille d' <i>Acer obtusatum</i> selon le premier axe.	53

Figure44 : Visualisation du changement de conformation de la feuille d'*Acer obtusatum* selon le deuxième axe 54

Figure45 : Visualisation du changement de conformation de la feuille d'*Acer obtusatum* selon le troisième axe..... 55

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Position taxonomique du genre <i>Acer</i> au sein du règne végétal	3
Tableau 2 : Situation géographique de nos stations d'étude.....	18
Tableau 3 : Paramètres mesurés sur les feuilles d' <i>Acer monspessulanum</i>	25
Tableau 4 : Paramètres mesurés sur les feuilles d' <i>A. obtusatum</i>	26
Tableau 5 : Description des points repères choisis pour <i>A. monspessulanum</i>	28
Tableau 6 : Description des points repères choisis pour <i>A. obtusatum</i>	28
Tableau 7 : Paramètres statistiques des caractéristiques quantitatives mesurées sur la feuille d' <i>Acer monspessulanum</i>	35
Tableau 8 : Paramètres statistiques sur les caractères quantitatives mesurés sur la feuille d' <i>Acer monspessulanum</i> selon les stations	35
Tableau 9 : Résultat de l'analyse hiérarchique de la variance de la taille du centroïde pour <i>A. monspessulanum</i>	37
Tableau 10 : Résultat de l'analyse hiérarchique de la variance de la conformation pour <i>A. monspessulanum</i>	38
Tableau 11 : Résultat de l'analyse hiérarchique de la variance de la taille du centroïde pour <i>A. obtusatum</i>	48
Tableau 12 : Résultat de l'analyse hiérarchique de la variance de la conformation pour <i>A. obtusatum</i>	48

Table des matières

Introduction générale.....	1
-----------------------------------	----------

Chapitre 1 : Généralités sur les Erables

1. Systématique et description botanique	3
1.1. Systématique.....	3
1.2. Description botanique.....	4
1.2.1. Appareil végétatif.....	4
1.2.2. Appareil reproducteur.....	4
2. Origine paléogéographique des Erables	5
3. Distribution actuelle	5
4. Les Erables en Algérie.....	6
4.1. <i>Acer monspessulanum</i>	7
4.2. <i>Acer campestre</i>	8
4.3. <i>Acer obtusatum</i>	8
4.4. <i>Acer opalus</i>	9

Chapitre 2 : La morphométrie et ses principaux concepts

1. La morphométrie.....	9
1.1. La morphométrie classique.....	9
1.2. La morphométrie moderne.....	10
2. Principaux concepts de la morphométrie moderne.....	10
2.1. La taille.....	10
2.2. La conformation.....	10
2.3. L'espace morphométrique.....	11
3. les différentes approches en Morphométrie géométrique.....	12
3.1. Approche par les courbes de contours.....	12
3.2. Approche par les points repères.....	13
4. Les étapes de l'étude MG par l'approche des points repères.....	13
4.1. Choix des points repères.....	13
4.2. Collectes des données.....	14
4.3. Extraction des informations de conformation.....	14
4.3.1. Centrage ou translation.....	14
4.3.2. Mise à l'échelle.....	14
4.3.3. Rotation	15
4.4. Analyses statistiques.....	15

4.5. Visualisation graphique des différences de conformation.....	16
---	----

Chapitre 3 : Matériel et Méthodes

1. Présentation de la zone d'étude	18
1.1. Situation géographique des stations.....	18
1.2. Description des stations	19
1.2.1. Description de la station d'Azrou N'Thor.....	19
1.2.2. Description de la station de Tala Guilef.....	20
1.2.2.a. Description du site de Djamaa Adharchi.....	20
1.2.2.b. Description du site d'IghzarIkheradhen.....	21
1.2.3. Description de la station de Taouialt.....	21
1.2.4. Description de la station de Tigounatine.....	23
2. Récolte du matériel végétal.....	23
2.1. Échantillonnage de <i>Acer monspessulanum</i> ...	23
2.2. Echantillonnage de <i>Acer obtusatum</i>	24
3. Méthodes de mesures.....	24
3.1. Mesures morphométrique classiques.....	24
3.1.1. Mesures de <i>Acer monspessulanum</i>	24
3.1.2. Mesures de <i>Acer obtusatum</i>	25
3.2. Mesures morphométrie modernes	26
3.2.1. Protocol de mesure de la conformation par la MG.....	26
3.2.1.a. Préparation des échantillons	26
3.2.1.b. Choix des points repères	27
3.2.1.c. Collecte des données.....	28
3.2.1.d. Vérification des données	31
3.2.1.e. Approximation de l'espace tangent à l'aide de TpsSmall	31
3.2.1.f. Analyse des valeurs aberrantes	31
3.2.1.g. Analyse de la conformation.....	31

Chapitre 4 : Présentation des résultats et discussion

1. Analyse des mesures morphométriques classiques pour <i>Acer monspessulanum</i>	32
1.1. Variabilité inter-stationnelle	32
1.2. Variabilité inter-arbre	35
1.3. Corrélation entre les caractères mesurés	36
2. Analyse des mesures de morphométrie moderne pour <i>A. monspessulanum</i>	36
2.1. Vérification des données	36
2.1.1. Approximation de l'espace tangent avec TpsSmall	36
2.1.2. Vérification des valeurs aberrantes	36
2.2. Résultats des superpositions de Procruste	37

2.3.Résultats de l'ANOVA.....	37
2.4.Résultat de l'ACP.....	38
2.4.1. Changement de conformation dans le premier axe	39
2.4.2. Changement de conformation dans le deuxième axe	44
2.4.3. Changement de conformation dans le troisième axe	45
3. Analyse des mesures de morphométrie moderne pour <i>A. obtusatum</i>	46
3.1.Vérification des données	46
3.1.1. Approximation de l'espace tangent avec TpsSmall	46
3.1.2. Vérification des valeurs aberrantes	46
3.2.Résultat des superpositions de Procrute	47
3.3.Résultats de l'ANOVA.....	47
3.4.Résultat de l'ACP	48
3.4.1. Changement de conformation dans le premier axe	53
3.4.2. Changement de conformation dans le deuxième axe	54
3.4.3. Changement de conformation dans le troisième axe	54
4. Discussion.....	55
4.1.Variation morphologique des feuilles	56
4.1.1. Variation intra-arbre	56
4.1.2. Variation inter-arbre	58
4.1.3. Variation inter-stationnelle	59
4.2.Apport de la morphométrie classique et moderne	59
Conclusion.....	61
Références bibliographiques	63
Annexe	

Introduction générale

Pendant des siècles, les naturalistes se sont émerveillés de la diversité et de la complexité de la vie sur terre et se sont intéressés à la morphologie, considérée comme l'une des sources d'information la plus riche et la plus fiable concernant les questions relatives aux relations systématiques, évolutives et écologiques (McLellan et Endler, 1998). Cette fascination de longue date avec la forme biologique a façonné les perspectives actuelles sur de nombreux sujets biologiques y compris les notions de discontinuités taxonomiques, les méthodes de classification, et les hypothèses de la relation structure-fonction (Adams *et al.*, 2013).

En Botanique, la forme des feuilles, des pétales et de la plante toute entière sont d'une grande significativité car elles permettent de distinguer entre les espèces (Cope *et al.*, 2012). Chez les Erables, les espèces peuvent être identifiées aisément grâce à leurs feuilles et leur fruits très caractéristiques (Ogata, 1967 ; De Jong, 1976). La morphologie des feuilles de ces espèces est un caractère très discriminant, le nombre de lobes ; les sinus formés par l'insertion des lobes ; leur système de nervation et leur pubescence sont des caractères très utilisés pour l'identification des espèces (De Jong, 1976). En outre, cet auteur signale la capacité d'hybridation des espèces du genre *Acer*, notamment celles appartenant à une même section et une même série.

L'étude de la forme suscitant toujours des interrogations, des techniques se sont développées dans une discipline quantitative rigoureuse appelée « la morphométrie » (Adams *et al.*, 2013). La morphométrie est la description de la variation de la forme biologique par la statistique quantitative (Rohlf, 1990 ; Zelditch *et al.*, 2012 ; Cardini, 2013). On distingue aujourd'hui la morphométrie traditionnelle qui est basée sur la mesure des distances, des angles et la morphométrie géométrique (Rohlf et Slice, 1990). Cardini et Viscosi (2011) soulignent que cette dernière méthode est de plus en plus utilisée en botanique pour résoudre des problèmes taxonomiques et l'identification des espèces ainsi que leurs hybrides.

En Algérie, Barour (2012) fut le premier à appliquer cette méthode dans sa thèse de doctorat pour l'analyse de la biodiversité des populations d'Abeilles Mellifères (*Apis mellifera*), Lateb (2014) quand à lui l'a appliquée sur les chênes de l'Akfadou. Les résultats de ce dernier sont très intéressants. En effet, il a pu mettre en évidence la présence de trois hybrides potentiels en plus des deux cités dans la littérature à savoir $\times$ *Quercus kabylica* et $\times$ *Q. numidica*.

Le peu d'études réalisé sur les espèces d'Erables en Algérie ainsi que les résultats discriminants de la méthode de morphométrie géométriques réalisé sur les feuilles d'Erables d'Amérique du Nord (Jesens *et al.*, 2002) et d'autres espèces notamment les chênes dans les nombreux travaux réalisés par Viscosi *et al.*, (2009 ; 2010) et Viscosi et Cardini (2011) nous ont encouragé à opter pour l'analyse de la morphologie des feuilles de deux espèces d'*Acer* au Djurdjura par la méthode morphométrique géométriques à côté de l'analyse des mesures de morphométrie classique.

C'est dans ce cadre que notre travail est mis en place, il a pour objectif d'étudier la morphologie des feuilles d'Erables (*Acer monspessulanum* et *Acer obtusatum*) afin d'analyser la variabilité morphologique interindividuelle et inter stationnelle et cela par la méthode morphométrique classique et moderne. Notre présent travail est subdivisé en quatre chapitres :

- Un premier chapitre intitulé « Généralités sur les Erables » consacré à la description du genre *Acer*, la distribution du genre dans le monde, en Méditerranée et en Algérie. Avec les différentes espèces retrouvées à l'état naturel en Algérie.
- Un deuxième chapitre consacré aux méthodes morphométriques où nous exposons les deux méthodes de la morphométrie : la morphométrie classique et la morphométrie géométrie et ses principaux concepts.
- Un troisième chapitre consacré au matériel et méthodes. Une première partie est consacrée à la description de la zone d'étude et la deuxième à la méthode d'échantillonnage ainsi qu'aux logiciels utilisés.
- Un quatrième chapitre consacré aux résultats et discussion.

Chapitre 1

Généralités sur les Erables

Le genre *Acer* fut cité pour la première fois par Tournefort en 1719, il a été accepté et repris par Linné en 1735 dans la première édition de son ouvrage « *Generaplantarum* », puis en 1753 où il identifia 9 espèces (De Jong, 1976).

L'origine du nom *Acer* dérive du latin médiévale « *acerabulus* », composé de deux noms ; *acer* et d'une finale *-abulus*. *Acer* signifie en latin « aigu » (d'où le terme acéré), il a été probablement attribué aux Erables parce que leur bois dur et droit, servait à faire des hampes de lances à extrémité pointues. Le suffixe *abulus* provient probablement du gaulois et désigne un arbre indéterminé (Couplant, 2012).

1. Systématique et description botanique

1.1. Systématique des Erables

Depuis l'identification du genre *Acer* par Carl Von Linné, sa classification a suscité beaucoup de controverses (Grimmet *al.*, 2003). Tantôt classé dans la famille des Acéracées, tantôt inclus dans celle des Sapindacées. Ce sont les récentes études phylogénétiques basées sur les marqueurs moléculaires (ADN, ITS, ARN) qui viennent mettre un terme à ce débat et affirment que le genre *Acer* appartient à la famille des Sapindacées (Liet *a.*, 2006).

La troisième version de la classification phylogénétique des angiospermes APG III (2009) donne la classification suivante :

Tableau 1 : Position taxonomique du genre *Acer* au sein du règne végétal

Embranchement	Spermatophytes
Sous-embranchement	Angiospermes
Classe	Dicotylédones
Sous classe	Rosidées
Ordre	Sapindales
Famille	Sapindacées
Tribu	<i>Acereae</i>
Genre	<i>Acer</i> L.

Pax est considéré comme l'un des auteurs les plus importants ayant travaillé sur le genre *Acer*. Ses travaux lui ont permis d'identifier une centaine d'espèces et de mettre en place une clé de détermination basée sur la morphologie des feuilles, des inflorescences, des fleurs et des fruits. Il a classé ces espèces dans 04 groupes, 13 sections et 17 séries. Cette clé a servi de base pour les études ultérieures (De Jong, 1976, Huang *et al.*, 2002). Des auteurs ont par la suite apporté des modifications en se basant sur l'anatomie de la feuille (Pojarkova, 1933 in De Jong, 1976), la morphologie des bourgeons et le type d'inflorescences Ogata (1967), la phénologie de la fleur (De Jong, 1976), l'architecture des nervures des feuilles (Tanai, 1978), la morphologie du fruit (Tanai, 1986), les nervures terminales, la morphologie du fruit et les caractères anatomiques (Tanai & Wolf, 1987).

Plus récemment, des auteurs tels Hasebe *et al.* (1998), Ackerly et Donoghue (1998), Suhet *al.*, (2000) se sont intéressés à la reconstruction phylogénétique grâce aux marqueurs moléculaires pour mettre en évidence les liens entre les différentes sections.

Les systématiciens ont divisé le genre *Acer* en 22 sections avec quelques sections qui ont été elles-mêmes divisées en séries (Li *et al.*, 2006) (Annexe).

1.2. Description botanique

1.2.1. Appareil végétatif

Le genre *Acer* regroupe plus d'une centaine d'espèces d'arbres et arbustes à majorité monoïques, toutefois, 13 espèces sont dioïques (Renner *et al.*, 2007).

La hauteur des arbres à maturité varie selon les espèces de 6-10 m chez *A. spicatum* espèce de sous-bois Nord-Américaine jusqu'à 25-30 m chez les espèces de haute canopée tel *A. rubrum* (Ackerly *et al.* 1998).

L'Erable est caractérisés par des feuilles opposées, essentiellement caduques mais quelques taxons sont à feuillage persistant et sont localisés essentiellement au Sud de l'Asie et de l'Europe tel *A. sempervirens* (De Jong, 1976). Cet auteur note la grande variabilité de la taille et de la morphologie des feuilles au sein du genre passant des espèces à feuilles simples, à feuilles lobées aux espèces à feuilles composées. Cependant, les espèces les plus communes sont les feuilles tri- ou penta-lobés.

1.2.2. Appareil reproducteur

La fleur est actinomorphe à 5 sépales et 5 pétales, généralement très petite ; 5 (10-14) étamines ; 2 carpelles (3-5) dans un ovaire super ; 1 style plus au moins développé et deux stigmates. Les fleurs sont groupées en panicule ou corymbe (Pignatti, 1982).

Chez le genre *Acer*, les fleurs peuvent être bisexuées ou unisexuées. Cependant, elles sont fonctionnellement unisexuées (Renner *et al.*, 2007) à cause de l'avortement du pistil et la présence d'anthères qui ne parviennent pas à s'ouvrir (De Jong, 1976)

Plusieurs auteurs ayant étudié la floraison chez le genre *Acer* sur de nombreuses années, indiquent que les Erables ont un système de reproduction très complexe (De Jong, 1976 ; Gleiser *et al.*, (2004) ; Renner *et al.*, 2007). Gleiser *et al.* (2004) le résume en cinq stratégies de reproductions : Monœcie duodichogame, Monœcie hétérodichogame, Trioécie hétérodichogame, Subdioécie dichogame et Dioécie. Il est également important de souligner l'existence d'individus à stratégie sexuelle labile, changeant de stratégie sur les années sous l'influence des interactions environnementales (Renner *et al.*, 2007)

2. Origine et Paléogéographie des Erables

De Jong (1976) estime que le genre *Acer* serait originaire du Sud-Est de la Chine et remonterait au début du Tertiaire (environ 65 millions d'années). En effet, Pojarkova (1933) pense que la migration de *Acer* vers l'Asie de l'Ouest, l'Europe et l'Amérique du Nord se serait effectuée durant l'Eocène mais la période des glaciations a causé l'extinction de plusieurs taxons au centre et au Nord de l'Europe, ainsi qu'en Asie du Nord. Le Sud de l'Asie, le centre de la Chine et le Japon ayant été épargné par ces changements drastiques du climat, a permis le maintien de beaucoup d'espèces reliques (Jong, 1976).

En outre, malgré la similitude des forêts tempérées de l'est de l'Asie, de l'Europe occidentale et de l'Amérique du Nord au Tertiaire, la plus grande quantité de fossiles a été retrouvée en Asie de l'Est. Les feuilles et les graines ailées sont les fossiles les plus abondants, tandis que les fleurs et le bois fossilisé sont très rares (Tanai, 1983).

3. Distribution actuelle

Actuellement, le genre *Acer* regroupe plus de 150 espèces. Il est considéré comme l'un des genres ligneux les plus diversifiés de l'hémisphère Nord (Li *et al.*, 2006). Sa distribution s'étend des régions subarctiques de l'Europe (Nord de la Suède) et de l'Amérique du Nord (Nord de l'Alaska) jusqu'aux régions tropicales de l'Amérique centrale (Mexique et Guatemala), également présent en Afrique du Nord et en Asie où il dépasse l'équateur atteignant 10° latitude Sud en Indonésie et Philippines (De Jong, 1976 ; Tanai, 1978) (**Fig.1**).

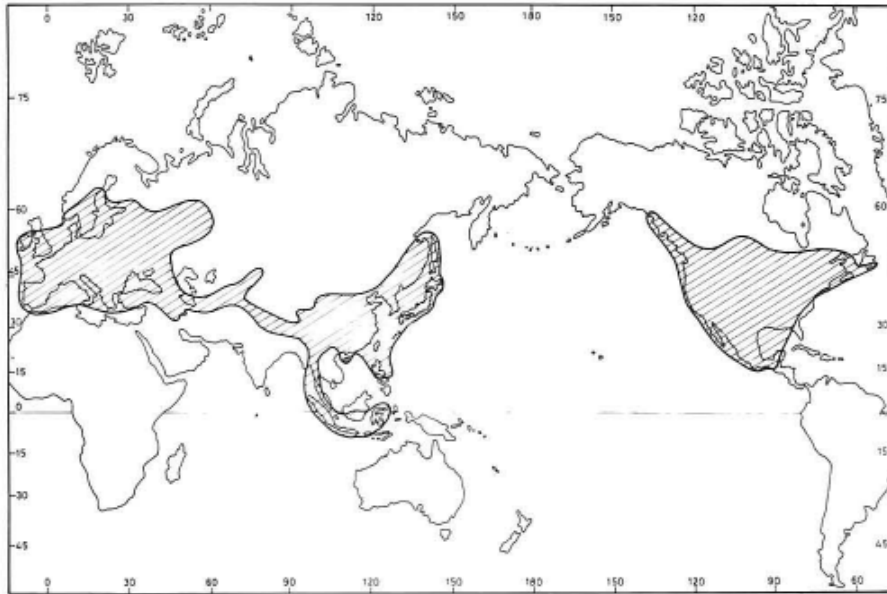


Figure 1 : Aire de distribution géographique du genre *Acer* L. (TANAI, 1978).

Malgré une grande distribution géographique, la majorité des espèces est centrée en Asie de l'Est où se maintient environ deux-tiers des espèces (Tanai, 1978). La Chine en particulier, est considérée comme le centre de la diversité spécifique des Erables (De Jong, 1976).

En méditerranée, Quézel et Médail (2003) rapportent la présence, avec une distribution discontinue, d'au moins 32 espèces et sous-espèces. La plus commune étant *Acer monspessulanum*.

4. Les Erables en Algérie

L'Afrique du Nord et particulièrement l'Algérie représentent la limite méridionale de l'aire de distribution des Erables des régions centrale et orientale de la méditerranée. Ils forment des peuplements discontinus localisés essentiellement dans les montagnes du Nord du pays.

Il existe quatre espèces d'Erables en Algérie décrites par Quézel et Santa (1963) : *Acer campestre* L., *A. monspessulanum* L., *A. obtusatum* W. & K. et *A. opalus* Mill. (Fig.2). En plus de ces quatre espèces, Quézel et Santa (1963) signalent la présence des hybrides de *A. monspessulanum* x *A. opalus* (*A. hyrcanum* Faurel et Maire) qui est assez commun dans les cédrâies du Chélich dans l'Aurès. Ces hybrides possèdent les feuilles d'*A. opalus* et les samaras de *A. monspessulanum*.

Ces essences s'installent entre 1200 et 2000 m d'altitude. *A. monspessulanum* est signalé sur le versant Nord du Chélia entre 1400 et 1800 m d'altitude et *A. opalus* entre 2000 et 2100 m d'altitude. (Abdessemed, 1981) en bioclimat subhumide supérieur froid à humide froid dans les Aurès (Azira, 2001 ; Meddour, 2010).

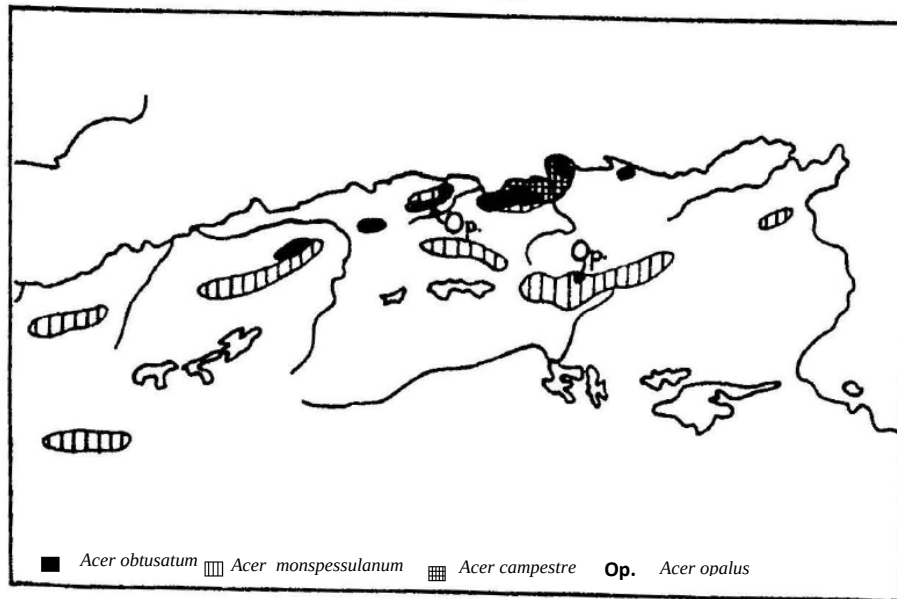


Figure 2 : Aire de distribution du genre *Acer* en Afrique du Nord (Quezel et Santa, 1963).

Au Djurdjura, *Acer* s'installe à 1400 m jusqu'à 1800 m d'altitude comme observé sur le massif d'Ait-Ouabane (Azira, 2001) néanmoins des individus sont observés à 900 m et 2000 m (Krouchi, observations personnelles). Les individus isolés apparaissent dès 1000 m d'altitude dans le massif de Chréa (Azira, 2001) alors que dans les Babors les premiers individus apparaissent à 1200 m sur le versant Nord atteignant 2000 m d'altitude (De Smet *et al.*, 1984 ; in Azira, 2001). Ces essences se développent dans les bioclimats humides et per-humide, variante à hiver froid et très froid dans ces massifs (Azira, 2001).

L'Erable est retrouvé généralement sur sol calcaire (Azira, 2001). Néanmoins, *A. monspessulanum* et *A. opalus* sont signalés sur substrat marneux et dolomite au Aurès (Abdessemed, 1981) et sur sol gréseux dans l'Akfadou pour l'*A. obtusatum* (Laribi M., 2000).

4.1 *Acer monspessulanum* L. (Nom commun : Erable de Montpellier)

Arbres ou arbuste, atteignant plus de 12 m (Rameau *et al.*, 2008) à longévité élevée ; rejetant de souche ; écorce lisse, gris jaunâtre devenant fendillée verticalement ; les jeunes rameaux sont opposés, glabres, à lenticelles. Les bourgeons sont petits, allongés, bruns, à écailles pubescentes, les latéraux écartés (Rameau *et al.*, 2008).



Les feuilles sont petites 3-6 cm ; à long pétiole ; 3 lobes arrondis et égaux (Rameau *et al.*, 2008) ; 3 nervures principales, longue insertion du lobe apical atteignant la moitié de la nervure principale ; feuilles coriaces, luisantes dessus ; pubescentes puis glabres ; base tronquée ou cordée (Pignatti, 1982).

Les fleurs de l'Erable de Montpellier sont actinomorphes, régulières (Rameau *et al.*, 2008) ; pétales et sépales jaunes de 3-4 mm de longueur, peu différenciées les unes des autres ;

pédoncule long de 2-4 cm (Pignatti, 1982) fleurs groupées en corymbe, d'abord dressées puis tombantes, glabres (Tutinet *al.*, 1978 ; Pignatti, 1982 ; Rameau Dému, 2008).

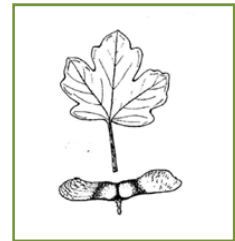
Les samares sont glabres à ailes dressées subparallèles rétrécies à la base et à marge dorsale fortement convexe (Quezel et Santa, 1963) les deux ailes forment un angle aigu, le fruit est plus ou moins rougeâtre à maturité (Pignatti, 1982).

Quézel et Santa (1963) signalent l'existence de deux sous espèces en Algérie :

- *Acer monspessulanum* subsp. *eu-monspessulanum* P. Four. [Syn= *A. monspessulanum* subsp. *monspessulanum*] commune dans les montagnes au dessus de 800 m d'altitude.
- *A. monspessulanum* subsp. *martini* (Jord.) P. Four. [Syn= *A. martinii*= *A. monspessulanum* var. *martinii* = *A. x martinii*= *A. x coriaceum*] Très rare, présent au Djurdjura et Thniet El Had.

4.2 *Acer campestre* L. (nom commun : Erable champêtre)

L'origine du nom de cette essence remonte à l'antiquité où elle était traditionnellement plantée et utilisée comme tuteur pour la culture des vignes, d'où son nom Erable des champs ou d'Erable champêtre (Ducciet *al.*, 2010).



Source (Quezel et Santa, 1963)

C'est un arbre de 12-15 m pouvant atteindre une hauteur de 25 m (Tutinet

al., 1978) ; à croissance lente et rejetant très bien de souche ; le tronc court est souvent garni de gourmands; houppier arrondi et dense ; l'écorce est brunâtre, fendillée, écailleuse et liégeuse (Rameau *et al.*, 2008).

Les jeunes rameaux sont opposés, de couleur brun-vert avec des lenticelles longitudinales orangés inférieur à 1 mm (Pignatti, 1982). Les bourgeons sont petits (4mm), ovoïdes à écailles beiges et velus au sommet (Rameau *et al.*, 2008) 5 à 8 paires d'écailles (Ogata, 1967).

Cette espèce est caractérisé par des feuilles de 4-7 cm de longueur, pubescentes (Tutinet *al.*, 1978) ; vertes sur les deux faces (Quezel et Santa, 1963) ; à 5 lobes inégaux, les latéraux beaucoup plus petits ; obtus ou arrondis, à nervation palmée (Pignatti, 1982 ; Rameau *et al.*, 2008) ; le lobe apical à incision profonde au 1/2 - 1/3 de la nervure centrale ; dents latérales du limbe effacées (Pignatti, 1982).

Espèce monoïque ; les fleurs régulières se formant avec les feuilles de couleur verdâtres ou jaune-vert, groupés par 5 à 20 en corymbe, dressées et pubescentes (Tutinet *al.*, 1978 ; Pignatti, 1982 ; Rameau *et al.*, 2008). Pédicelles et sépales pubescentes (Quezelet Santa, 1963).

Samares à ailes divergentes formant un angle de 150-180° (Pignatti, 1982) ; peu ou pas rétrécies à la base et à marge dorsale plus au moins rectiligne (Quezel et Santa, 1963).

4.3 *Acer obtusatum* Waldst. & Kit. (Nom commun: Erable à feuilles obtuses)

Arbre atteignant 8 m de hauteur, à longévité élevée, rejetant de souche (Rameau *et al.*, 2008) à écorce gris-violacée ; les rameaux de 3-5 ans avec des lacérations transversales ; les



Feuilles et fruits de *A. obtusatum*

jeunes rameaux ont des lenticelles allongées (Tutinet *al.*, 1978 ; Rameau *et al.*, 2008).

Cette espèce possède des feuilles de 6-12 cm pouvant atteindre 20 cm (Quezelet Medail, 1983) ; généralement 5 lobes et rarement 3, parfois les deux lobes basilaires seulement ébauchés (Rameau *et al.*, 2008) ; incision profonde du lobe apical au 1/6 – 1/3 de la nervure centrale, dents latérales obtuses ou presque nulles, base cordée ; pétiole généralement plus court que le limbe (Pignatti, 1982) surface inférieure densément pubescente ou tomenteuse sur l'ensemble de la surface et pas seulement le long de la nervure, poils persistants (Quezelet *al.*, 1983 ; Tutinet *al.*, 1978 ; Pignatti, 1982 ; Rameau *et al.*, 2008) la feuille est rouge à l'automne. (Rameau *et al.*, 2008).

La floraison se produit pendant le mois de Mars –Avril, avant la feuillaison ; les fleurs sont groupées en ombelle ou corymbe courte, riche en fleurs ; pédoncule pubescent, d'abord dressés puis pendant (Pignatti, 1982 ; Rameau *et al.*, 2008).

Les samares sont long de 2-5 cm, large de 8-10 mm de couleur verte (Rameau *et al.*, 2008) ; les ailes divergent de 60-90°, à bord externe droit, le bord interne élargi dans la moitié apicale (Pignatti, 1982 ; Rameau *et al.*, 2008) .

4.4 *Acer opalus* Mill. (Nom commun : Erable à feuille d'obier, Erable d'Italie)

Arbre de 10-20 m de hauteur, à longévité élevée pouvant atteindre 500 ans, rejette de souche, monoïque ou polygame ; il fleurit au printemps de Mars à Avril avant la feuillaison (Rameau *et al.*, 2008).



Source (Quezel et Santa, 1963)

Il est caractérisé par un tronc tordu, un houppier étalé et diffus ; l'écorce est d'abord gris-beige et lisse devenant par la suite brun-jaunâtre, écailleuse et crevassée ; les jeunes rameaux sont opposés, glabres, brillants de couleur brun-jaunâtre et pourvus de lenticelles ; les bourgeons sont allongés, ovoïdes, pointus, les latéraux écartés un peu pubescents.

Les feuilles sont grandes pouvant atteindre 10 cm mais souvent elles sont moins de 8 cm ; à 5 ou 7 lobes obtus ; aigus ou subaigus (Tutinet *al.*, 1978) ; séparés par des sinus formant un angle plus ou moins droit, peu dentées, en cœur à la base (Rameau *et al.*, 2008) ; la face inférieure souvent glabre excepté sur et à l'aisselle des nervures (Tutinet *al.*, 1978 ; Rameau *et al.*, 2008) ; la feuille est glauque en dessus Quezel et Santa, 1963 ; Rameau *et al.*, 2008).

Les fleurs sont actinomorphe, petite, de couleur jaune-verdâtre, pouvant être monoïque ou polygame. Elles sont groupées en corymbe terminaux, penchés (Rameau *et al.*, 2008) ; pédoncule glabre (Tutinet *al.*, 1978)

Les ailes des samares sont large 6-8 mm (Quezel et Santa, 1963) ; elles forment un angle aigu (Rameau *et al.*, 2008).

Chapitre 2

La morphométrie et ses principaux concepts

1. La morphométrie

La morphométrie est la description de la variation de la forme biologique par la statistique quantitative (Rohlf, 1990 ; Zelditch *et al.*, 2012 ; Cardini, 2013). Elle est utilisée chaque fois qu'il y a un besoin de décrire et/ou de comparer des formes d'organismes ou des structures particulières. Les échantillons peuvent alors représenter des spécimens de localités géographiques différentes, des stades de développement, des effets environnementaux, etc. (Rohlf et Marcus, 1993, Zelditch *et al.*, 2012).

La forme, la conformation et la taille sont des termes utilisés dans toutes les études morphométriques et il est important de bien les comprendre. Needham donne l'équation suivante « Form = Size + Shape » celle-ci a été traduite en Français par Boitard et Lefebvre en 1981 par la « Forme = Taille + Conformation » (Barour, 2012 ; Cucchi *et al.*, 2015). Cette équation définit la forme d'un objet comme étant la somme de deux éléments : la taille qui est l'ampleur ou l'échelle de l'objet, et la conformation qui est toute l'information géométrique qui reste une fois que la taille et la position (la translation et la rotation) sont enlevées.

Actuellement, deux types de morphométrie sont distinguées : la morphométrie dite classique et la morphométrie moderne (Rohlf et Slice, 1990 ; Adams *et al.*, 2004 ; Zelditch *et al.*, 2012).

1.1. Morphométrie classique

Même si la mesure de caractéristiques phénotypiques existe depuis plusieurs siècles, ce n'est qu'à la fin du 19^{ème} siècle que les scientifiques ont commencé à mesurer abondamment les traits phénotypiques et résumer leurs conclusions sous formes de moyennes et d'autres paramètres. Le développement des biostatistiques dans les années 1960, a permis ensuite à la morphométrie classique de se développer (Cardini, 2013).

La morphométrie classique appelée également morphométrie traditionnelle ou multivariée, est l'étude de la variation morphologique des objets ou structures par l'analyse statistique des mesures linéaires : distances, angles, ratios, volume, etc. (Marcus, 1990 ; Rohlf et Marcus, 1993). Ce fût Marcus (1993) qui lui donna le nom de « morphométrie classique » et cela après l'avènement de la morphométrie géométrique (Cardini, 2013).

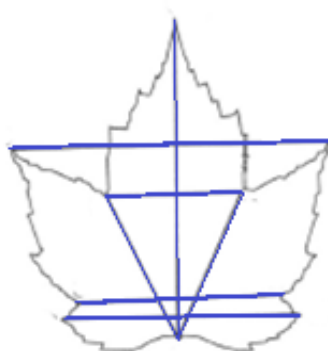


Figure 3 : Illustration de quelques mesures de distances et angles sur une feuille d'*Acer rubrum* (Jensen *et al.*, 2002).

Même si cette méthode offre toujours un large éventail de techniques pour traiter une variété de questions scientifiques en biologie et dans d'autres domaines (Cardini, 2013). Elle

présente néanmoins, quelques lacunes qui limitent l'interprétation biologique de la conformation (Rohlf et Marcus, 1993 ; Adams *et al.*, 2013 ; Cardini, 2013).

Selon Rohlf et Marcus (1993) il est impossible de couvrir la conformation de la forme originelle à partir des matrices de données de mesures de distances habituelles, même comme une représentation abstraite. En effet, la forme globale de l'objet n'est ni vraiment archivée ni utilisée dans l'analyse. Ils expliquent qu'un chercheur peut savoir par exemple si plusieurs mesures partagent un même point repère mais cette information n'est pas utilisée dans l'analyse multivariée. En conséquence, les analyses ne peuvent pas être aussi puissantes qu'elles pourraient l'être si cette information était prise en considération.

C'est pour répondre à toutes ces lacunes que s'est développée la morphométrie géométrique.

1.2. Morphométrie moderne ou morphométrie géométrique

La morphométrie moderne vise à modéliser la forme des objets naturels et à mesurer leurs différences en utilisant les coordonnées géométriques au lieu des mesures linéaires (Zelditch *et al.*, 2012 ; Poly *et al.*, 2012). Considérée comme assez récente, elle a pris un essor considérable durant les 30 dernières années grâce au développement des outils de traitement statistiques et de calculs informatiques (Loy *et al.*, 2000 ; Zelditch *et al.*, 2012 ; Mitteroecker *et al.*, 2013).

2. Principaux concepts de la morphométrie géométrique

2.1. La taille

La taille de mesure la plus communément utilisée en MG est appelée la taille du centroïde. Cette taille est préférée car elle n'induit pas de corrélation entre la taille et la conformation de l'objet analysé (Zelditch *et al.*, 2012). Elle est calculée par la racine carrée de la somme au carré des distances des points repères par rapport au centroïde (Fig.4).

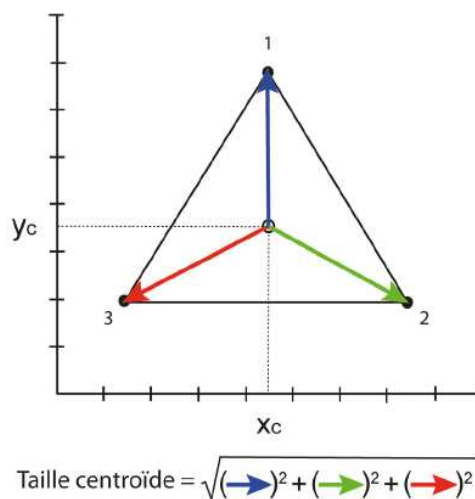


Figure 4 : La taille de centroïde (Zelditch *et al.*, 2012).

2.2. La conformation

La conformation géométrique correspond à la forme de l'objet indépendamment de sa taille (Conformation = Forme – Taille). Kendall (1977) la définit comme étant l'ensemble de l'information géométrique de l'objet, qui reste quand les effets de la translation, de l'échelle et de rotation sont éliminés. La translation qui est l'opération de déplacer un objet le long d'un axe (Fig.5A). La rotation (Fig.5B) et le redimensionnement (Fig.5C) n'altèrent pas la conformation.

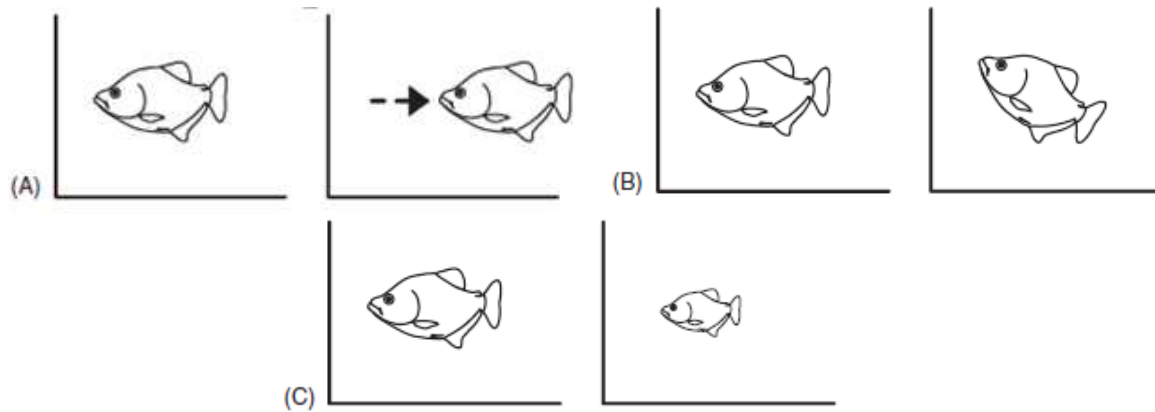


Figure 5 : Les trois opérations qui n'affectent pas la conformation : (A) Translation ; (B) Rotation et (C) Redimensionnement (Zelditch *et al.*, 2012).

Cette définition peut sembler abstraite mais nous l'appliquons intuitivement quand nous regardons une photo : notre cerveau élimine automatiquement les informations de la taille, de position et de l'orientation. Ainsi, nous pouvons reconnaître facilement une personne ou un objet sur une petite photo, même si nous sommes loin de celle-ci ou que nous maintenons la photo à l'envers (Klingenberg, 2010 ; Cucchi *et al.*, 2015).

2.3. Espace morphométrique

En morphométrie géométrique, les travaux de Kendall ont montré, par exemple, que les conformations géométriques les plus simples (triangles) sont situés dans un espace sphérique (si on tient compte des symétries possibles) ou hémisphériques (hors symétrie). Dans de tels espaces non linéaires, les analyses statistiques classiques et multivariées ne sont plus possibles. C'est ce qui justifie l'opération supplémentaire après la superposition qui consiste à projeter l'ensemble des conformations dans un espace tangent « tangent space » (Fig.6).

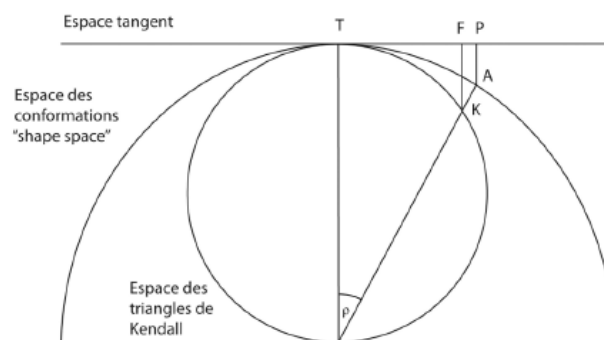


Figure 6 : Relation entre l'espace des triangles de Kendall, l'espace des conformations formalisés après les superposition Procrustes (« shape space») et l'espace tangent à l'espace de conformations (Cucchi *et al.*, 2015).

Le diagramme ci-dessus, montre une coupe passant par la conformation Procruste moyenne (consensus), qui est également le point tangent T. Le point F et P sont des projections orthogonales de A sur l'espace tangent à partir d'une seule conformation. Le terme « tangent » traduit simplement que les deux espaces sont tangents au point correspondant à la conformation moyenne (consensus) (Cucchi *et al.*, 2015).

La comparaison avec les projections cartographiques est ici totalement justifiée et permet de comprendre facilement le but de cette projection. Les cartes géographiques sont des représentations planes partielles ou totales du globe terrestre obtenues par différentes projections cartographiques. On pourra à juste titre objecter que ces cartes sont d'autant plus déformées que la surface couverte est importante. Il n'en va pas de même en morphométrie car l'espace de conformations biologique étudié n'occupe qu'une faible proportion de l'espace des conformations. D'expérience, les distances entre objets dans l'espace tangent diffèrent très peu de celle calculées dans l'espace des conformations et les corrélations observées sont toujours très élevées et très proches de 1 (Rohlf, 2000 ; Richstmeier *et al.*, 2002).

Les analyses statistiques s'effectueront donc avec les coordonnées des objets dans l'espace tangent qu'il s'agisse de tests uni-, bi- ou multivariés ou d'analyses factorielles. La taille centroïde utilisée en morphométrie géométrique est celle calculée sur les coordonnées brutes. Elle devra être transformée en logarithme pour être compatible avec les projections dans l'espace des analyses statistiques effectuées (Rohlf, 1990).

3. Les différentes approches de la morphométrie géométrique

Il est possible d'étudier la conformation d'un objet par deux techniques : les courbes de contour (Outlines) et les points-repères (Landmark) (Adams *et al.*, 2004 ; Zelditch *et al.*, 2012).

3.1. Approche par les courbes de contour (Outlines)

L'analyse des courbes de contour est considérée comme la première technique utilisée en morphométrie géométrique (Adams *et al.*, 2004). Elle consiste à numériser des points le long du contour d'une structure biologique, en considérant ces structures elles-mêmes comme homologues d'un spécimen à un autre, alors que les points cartésiens construits et collectés sur ces structures n'ont quant à eux aucune correspondance nette (Cucchi *et al.*, 2015).

Il existe plusieurs techniques pour l'analyse de ces courbes, nous allons en citer les plus utilisées :

➤ **Transformation de Fourier (Elliptic Fourier Descriptors) :** Les descripteurs elliptiques de Fourier (EFD) est une technique courante d'analyse de la conformation, où celle-ci est analysée dans le domaine de fréquence plutôt que dans le domaine spatial (Cope *et al.*, 2012). Elle consiste à porter des points le long du contour d'un objet ou structure qui seront ajustés avec une fonction mathématique (Adams *et al.*, 2004). Ces transformations permettent de décrire une fonction périodique en la décomposant en une série infinie de fonctions trigonométriques de longueurs d'ondes décroissantes (les harmoniques) définies par des termes « sinus » et « cosinus », eux mêmes pondérés par des coefficients (a_n et b_n) appelés coefficients de Fourier (Cucchi *et al.*, 2015).

➤ **Points glissants (Sliding semilandmarks)** : Conçue et développée par Bookstein (1997), cette technique est utilisée lorsqu'une région anatomique est dépourvue de points repères reconnaissable et précis ou que leur identification est difficile. Elle permet d'analyser au même temps des points repères homologues et des points glissant le long d'une courbe ou surface pour une même structure. Ces points glissants sont positionnés de façon géométrique. Ces derniers sont ensuite analysés par les superpositions de Procruste (Zelditch *et al.*, 2012, Cucchi *et al.*, 2015).

3.2.Approche par points repères (Landmarks)

L'approche la plus utilisée dans la morphométrie géométrique actuellement est l'analyse des conformations par les points repères (Klingenberg, 2010 ; 2011). Cette approche repose sur le choix de points repères (PR) sur un objet ou une structure, où l'homologie est l'un des critères essentiels dans leur sélection (Zelditch *et al.*, 2012).

Les points repères appelés également sites d'intérêt, représentent des emplacements à caractéristiques biologiques pertinents qui peuvent être enregistrés à partir d'une forme avec un degré acceptable d'exactitude et de précision dans un plan en 2 ou 3 dimensions (Richtsmeir *et al.*, 2002). Idéalement, les PR doivent être des positions anatomiques homologues qui n'altèrent pas la position topologique relative des autres PR ; doivent assurer la couverture adéquate de la morphologie de l'individu analysé ; être retrouvé à plusieurs reprises de manière fiable sur tout les spécimens étudiés ; et situés sur le même plan (Richtsmeir *et al.*, 2005 ; Zelditch *et al.*, 2012 ; Cucchi *et al.*, 2015).

Il est possible d'étudier la conformation d'un objet par sa surface en utilisant l'approche des points repères ainsi que par l'approche des points glissants et cela dans un plan en 3 D.

4. Les étapes de l'étude morphométrique géométrique par l'approche des points repères

4.1. Choix des points repères

Le choix des points repères est très délicat et doit se faire selon l'objectif de l'étude. En règle générale, les points repères doivent être choisis de sorte qu'on puisse quantifier les différences qu'on peut constater visuellement (Zelditch *et al.*, 2012).

Bookstein (1991) définit trois types de points repères (PR) :

- **Type I** : c'est des sites qui ont une définition anatomique ou histologique tel qu'une intersection de tissus. L'homologie est certaine et n'est pas remise en question selon la variation de la conformation;
- **Type II** : c'est des sites situés à l'extrémité d'un même tissu et qui ont une définition géométrique, par exemple les endroits de maximum de courbure. Leur homologie est discutable;
- **Type III**: c'est des sites choisis par l'expérimentateur, situé à distance d'un élément anatomique repérable, et où l'homologie est incertaine. Ces points repères sont assez difficile à formaliser car leur définition nécessite la localisation préalable d'autres repères de types I et II.

Bookstein (1991) précise que pour une étude fiable qui permet une bonne comparaison des conformations géométriques, il est meilleur d'utiliser un maximum de PR de type I.

4.2. Collecte des données

Les coordonnées cartésiennes (X et Y sur les données en 2D et X, Y et Z pour les données en 3D) des points repères peuvent être obtenues par plusieurs méthodes. Les PR peuvent être numérisés à l'aide de programmes tels que TPSDig ou ImageJ sur les structures en 2D et à partir de scanners de surface ou des caméras tridimensionnelles sur les structures 3D (Cardini, 2013).

4.3. Extraction des informations de conformation

Les conformations étant définie par les coordonnées relatives entre les différents PR, elles doivent être placées dans un même référentiel avant de pouvoir être comparées (Perrard, 2012 ; Metaire, 2014) Pour cela, plusieurs méthodes d'alignement des conformations géométriques existent, mais la méthode de superposition généralisée de Procruste ou GPA « Generalized Procrustes Analysis » est la plus utilisée (Viscosi et Cardini, 2011).

Le nom « Procruste » vient de la mythologie grecque, la légende raconte que c'était un aubergiste qui adaptait la taille de ses visiteurs (ses victimes) à la dimension du lit dont il dispose, soit en les étirant quand ils étaient petits par rapport au lit, ou en les tronquant lorsqu'ils étaient très grands. De cette manière Procruste minimisait la différence entre la taille de ses visiteurs et celle du lit (Zelditch *et al.*, 2012) de ce concept est née la méthode de superposition de Procruste qui vise à minimiser les différences entre les différentes configurations et le consensus.

La superposition de Procruste consiste à prendre les données brutes issues de la numérisation des points repères pour les transformer en données à analyser (Klingenberg, 2010 ; Zelditch *et al.*, 2012). Ceci obéit à trois principales étapes de transformation de coordonnées brutes : la translation, la mise à l'échelle et la rotation (Fig.7).

4.3.1. Centrage ou translation

Pour supprimer la variation de position, un calcul du centre de gravité de chaque configuration est réalisé (Fig.7.a). Toutes les configurations sont ensuite déplacées de façon que leur centre de gravité, appelé également « centroïde », soit à l'origine du système de coordonnées. Les différences de translation selon les axes X et Y sont éliminées et les nouvelles coordonnées du centre de gravité deviennent (0,0) pour tous les échantillons. (Fig.7.b).

4.3.2. Mise à l'échelle

Lors de cette étape, toutes les configurations des points repères sont mises à un format de taille standardisé appelé « taille du centroïde ». C'est une mesure de dispersion des points repères de la conformation par rapport au centroïde, elle correspond à la racine carrée de la somme des carrées des distances entre chaque PR et le centroïde (Klingenberg, 2010 ; Zelditch *et al.*, 2012; Cucchi *et al.*, 2015)(Fig.7.c).

De façon conventionnelle, toutes les configurations de points sont standardisées avec une taille centroïde de 1 (Cucchi, 2015). La mise à l'échelle se fait en divisant chaque coordonnée par la taille centroïde de la conformation (Perrard, 2012). Cette seconde étape supprime les effets de taille mais conserve intégralement les proportions des objets.

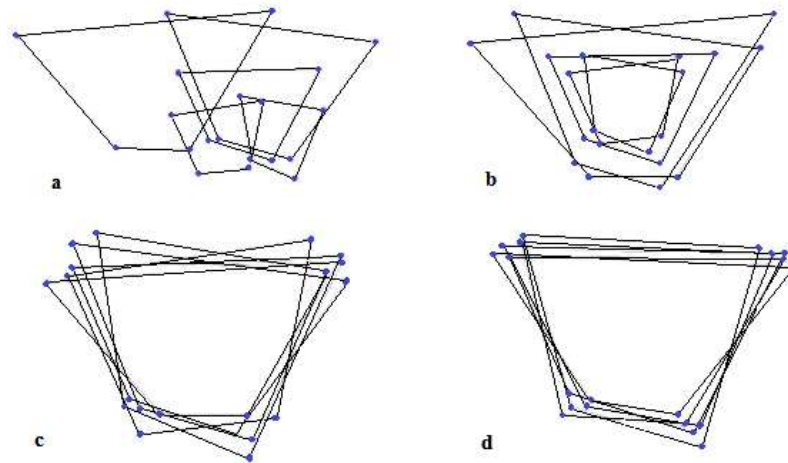


Figure 7: Les étapes des superpositions de Procruste (Mitteroecker *et al.*, 2013).

4.3.3. Rotation

Les configurations sont mises en rotation autour du centre de gravité commun pour amener toutes les configurations en une orientation optimale dans laquelle la somme des carrés des écarts entre les points repères correspondants est minimale. Cette étape supprime les effets de rotation et minimise au même temps les différences entre tous les objets (Rohlf et Slice, 1990 ; Klingenberg, 2010 ; Cucchi *et al.*, 2015) (Fig. 07.d).

Après la superposition de Procruste dont le but est de séparer la taille et la conformation et de projeter les coordonnées d'un espace de conformation (shape-space) euclidien tangent à l'espace de conformation de Procruste (Viscosi et Cardini, 2011), les points repères sont décrits par de nouvelles coordonnées. Ces dernières sont comparables : on va donc pouvoir comparer les différents objets de l'étude, ce qui n'était pas le cas avant la superposition. L'équation de Needham « forme = taille + conformation » est toujours valable après la superposition. La conformation est définie par les nouvelles coordonnées obtenues après superposition, la taille devient la taille centroïde et la forme correspond toujours à la somme des deux (Metaire, 2014).

4.4. Analyse statistique

Après les superpositions de Procruste, un large éventail d'analyses peut être utilisé pour analyser la variation de conformation ou de le relier à d'autres informations (Klingenberg, 2002, 2011).

4.5. Visualisation graphique des différences de conformations

La visualisation des différences de conformation peut s'effectuer soit directement à partir des différences entre deux conformations de points qui sont par définitions superposés, soit en faisant appel aux plaques minces (Thin Plate Spline) (Cucchi *et al.*, 2015).

La visualisation des différences de conformation se fait par l'interprétation des déplacements relatifs des coordonnées de points repères par rapport au consensus (Fig.8A). Les points sombres représentent la localisation des PR de la conformation consensus alors que le vecteur représente l'intensité et l'orientation de la conformation cible. Plus le vecteur est long et plus la différence de conformation par rapport au consensus est importante.

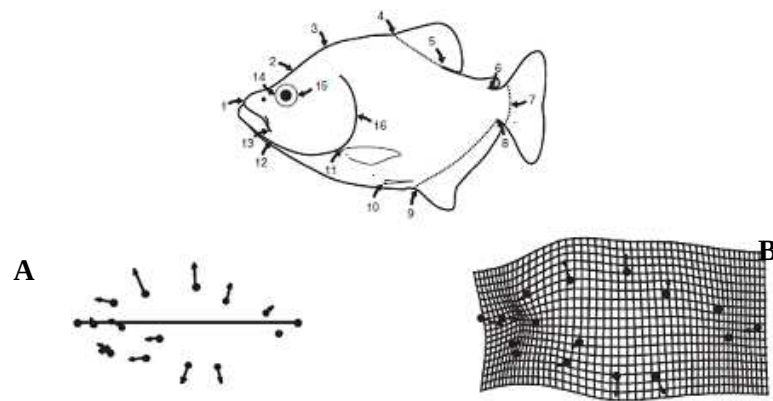


Figure 8 : Moyens de visualisation des différences de conformation : **A**. Par les vecteurs de déplacement des PR; **B**. Par les Splines en plaque mince (Zelditch *et al.*, 2012).

Même si il est assez facile et évident d'interpréter la variation de conformation et connaître ainsi la relation entre les PR à partir de cette méthode, cette tâche est au même temps difficile et délicate car il est nécessaire de lire le déplacement de tous les PR au même temps. Il est mentalement difficile de suivre le déplacement de tous ces PR, car il faut regarder à la fois la longueur des vecteurs et leurs directions, déterminer si plusieurs PR sont déplacés à un degré similaire, ou si certains sont déplacés relativement plus ou moins que d'autres et sans oublier les PR qui ne sont pas déplacés par rapport aux autres qui doivent également être pris en considération (Zelditch *et al.*, 2012).

Toutes ces exigences ont poussé les scientifiques à développer une autre méthode pour visualiser les changements sur l'ensemble des points repères. S'inspirant des déformations de la grille de Sir D'Arcy Thompson (1942) Bookstein a développé le diagramme de visualisation de la conformation dans la Spline en plaque mince (figure 08.B). Viscosi et Cardini (2011) expliquent l'idée de Thompson (Fig.9) qui était de décrire les changements de conformation en superposant une grille rectiligne sur une conformation de départ, par exemple un poisson, puis utiliser des transformations mathématiques simples pour déformer cette grille afin de la correspondre à une cible, un autre poisson avec une conformation différente.

Apportant des corrections à la méthode développée par D'Arcy Thompson, Bookstein (1989, 1991) adapte la méthode de plaque mince (Thin-plate-Spline) pour une utilisation en morphométrie. Il traite à la fois le problème de l'intégration des informations sur la position relative de tous les PR et le problème classique posé par D'Arcy Thompson (1942) qui est d'exprimer les différences de conformation entre deux échantillons comme une cartographie globale de l'espace cartésien d'un échantillon dans un autre (Slice, 2007 ; 2005).

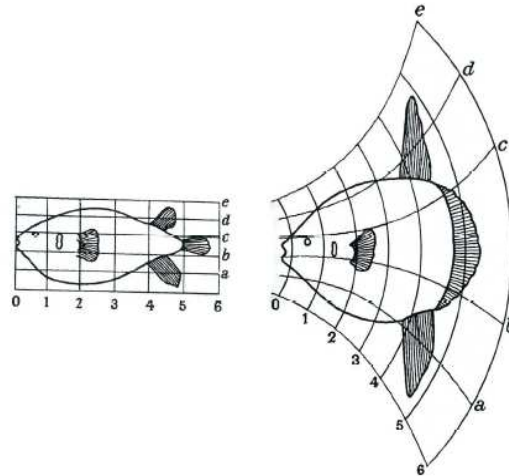


Figure 9: Grille de déformation de D'Arcy Thompson's (1917) montrant les changements de conformation entre le Diodon et le poisson lune Mola (in Cucchi *et al.*, 2015).

Le terme de « plaque mince » utilisé dans le domaine de l'ingénierie, vient du fait que cette méthode simule plus au moins la façon dont une plaque de métal fine se comporterait si elle passait par tous les points repères de la conformation. Son concept s'appuie sur la construction d'une grille de cellule carrée sur la conformation de référence et calculer ensuite comment la conformation consensus peut se déformer pour épouser la conformation cible (Webster et Sheets, 2010 ; Viscosi et Cardini, 2011). Et ceci est fait en utilisant une fonction d'interpolation pour produire des déformations lisses. Le lissage est effectué en réduisant au minimum la courbure de la plaque mince où les sites d'intérêt de la conformation de départ sont placés et manipulées jusqu'à ce qu'ils se chevauchent avec ceux de la configuration cible. Cette opération produit des vecteurs de coefficients qui peuvent être utilisés pour prédire la manière dont les lignes de grille peuvent changer à cause de la déformation (Viscosi et Cardini, 2011).

Le principal avantage des méthodes de splines plaque mince est que nous pouvons travailler avec 2K-4 des variables, de sorte que le nombre de variables et le nombre de degrés de liberté sont les mêmes (Zelditch *et al.*, 2012). Bookstein (1991), qui a appliqué les plaques minces à la morphométrie géométrique défend fortement ce deuxième mode de visualisation qui est le seul à prendre en compte le lien entre tous les points résultant de la superposition Procruste. Les deux combinés permettent cependant deux échelles complémentaires de visualisation (Cucchi *et al.*, 2015).

Chapitre 3

Matériel et Méthodes

1. Présentation de la zone d'étude

1.1. Situation géographique

Nous avons sillonné plusieurs stations au niveau de trois régions forestières du massif du Djurdjura : Tala Guilef, Tikjda et Azrou N'Thor, mais notre échantillonnage ne s'est effectué que dans les stations suivantes (Fig.10) :

- Tala Guilef située sur le versant Nord du Djurdjura occidental, où nous avons deux sites d'échantillonnage : Djamaa Adharchi et Ighzer Ikheradhen.
- Tikjda dans la forêt de Taouialt, située sur le versant Sud du Djurdjura.
- Azrou N'Thor est située sur le versant Nord du Djurdjura.

Les deux stations (Tala Guilef et Taouialt) sont localisées au sein du Parc National du Djurdjura, alors que la station d'Azrou N'Thor est située à la périphérie du PND.

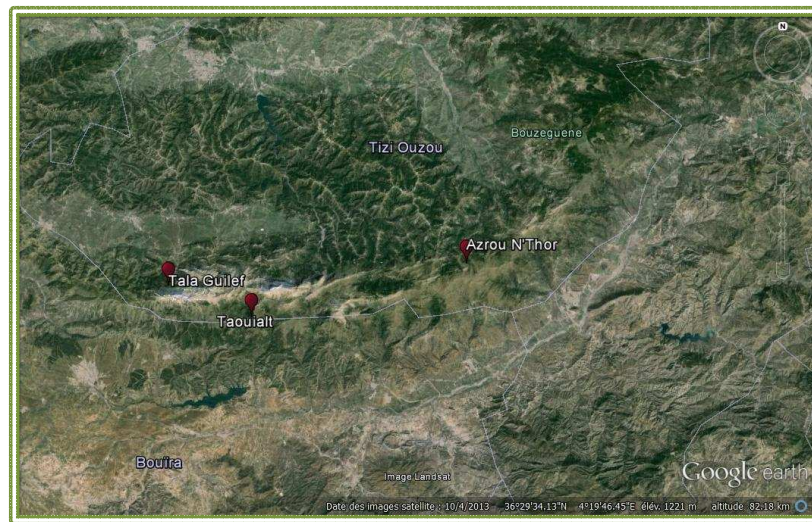


Figure 10: Localisation des stations échantillonnées sur une photo de Google Earth (Avril 2013).

Tableau 2 : Situation géographique de nos stations d'étude

Massif forestier	Station	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Espèce échantillonnée
Tikjda	Taouialt	36°26'31.28'' N	04°06'46.72'' E	1592	<i>Acer obtusatum</i>
Tala Guilef	Ighzar Ikheradhen	36°28'32.84'' N	04°00'27.00'' E	1450	
	Djamaa Adharchi	36°28'14.4'' N	03°39'55.48'' E	1290	<i>Acer monspessulanum</i>
Azrou N'Thor	Azrou N'Thor	36°29'40.41'' N	04°23'25.69'' E	1289	

1.2. Description des stations

1.2.1. Description de la station d’Azrou N’Thor

Cette station est rattachée administrativement à la commune d’Illilten (daïra d’Iffarhounene, wilaya de Tizi-Ouzou). Située en dehors du Parc national du Djurdjura, elle n’est pas moins intéressante. Lapie et Maige rapportent en 1914, que des peuplements de Cèdre s’étendaient d’Azrou N’Thor jusqu’à Tala Guilef, actuellement à Azrou N’Thor il n’en reste que des lambeaux.

La station échantillonnée est située en contrebas du mont d’Azrou N’Thor à 1290 m d’altitude, nous pouvons la rallier en passant par la piste forestière de moins de 2 km d’Ait Adella, le village le plus proche. La pression anthropique (surpâturage et la coupe de bois) est importante. Un grand glissement de terrain s’est produit en Mars 2013 induisant une forte érosion (Fig.11.A). L’absence d’un bon aménagement de la piste forestière accentue cette érosion, en effet nous avons remarqué que plusieurs arbres ont leurs racines déterrées et exposées ainsi à l’air (Figure 12.C et 2.D).

C’est une station à exposition Nord avec une pente de 20-25% où domine l’Erable de Montpellier qui s’y maintient sur les cônes d’éboulis (Fig.10.B et C) et le long des cours d’eau mélangé avec des espèces de ripisylves dont l’Orme (*Ulmus communi*) et le peuplier noir (*Populus nigra*). Nous retrouvons également plusieurs espèces forestières telle que *Ilex aquifolium*, *Quercus rotundifolia*, et quelques pieds isolés de *Cedrus atlantica*. Le substrat y est superficiel et caillouteux.

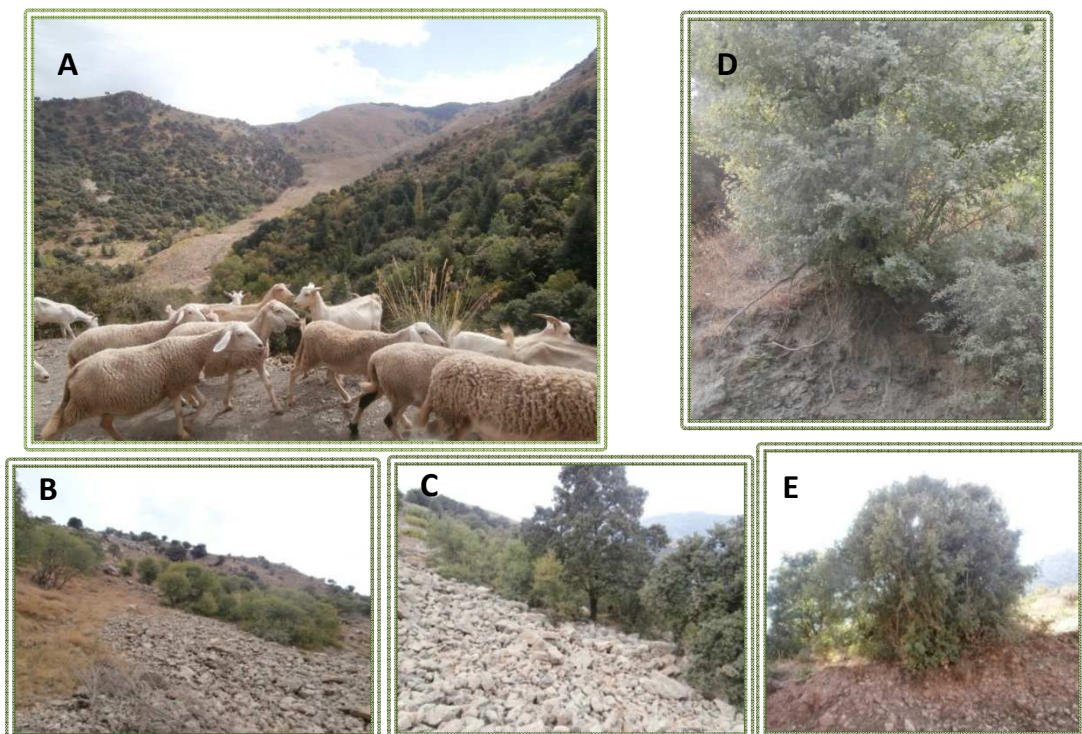


Figure 11 : Quelques photos de la station d’Azrou N’Thor : A. Vue générale montrant le glissement de terrain de Mars 2013; B. et C. : *A. monspessulanum* sur conne d’éboulis ; D. et E. : Erosion (Cliché Septembre 2014).

1.2.2. Description de la station de Tala Guilef

Nous avons échantillonné deux sites à Tala Guilef : Djamaa adharchi et Ighzar Ikharadhen.

1.2.2.a Description du site de Djamaa Adharchi

Djamaa Adharchi en kabyle Djamaa est un endroit plat, Adharchi est le nom donné à l'Erable. Ce nom indique ainsi un plateau où domine l'Erable. Effectivement, cette station à exposition Nord est un replat du piémont des grands escarpements rocheux du massif de Haizer située à 1290 m, la pente est y moyenne 10-15 % en contrebas pour augmenter au fur à mesure que nous montons en altitude et devenir abrupte en montant vers le massif de Haizer. Elle est caractérisée par une pelouse écorchée parsemée de pierres d'éboulis (Fig.12).

L'Erable de Montpellier y domine mais nous retrouvons également *Crateagus monogyna*, *Prunus prostrata* et quelques pieds isolés de *Cedrus atlantica*.

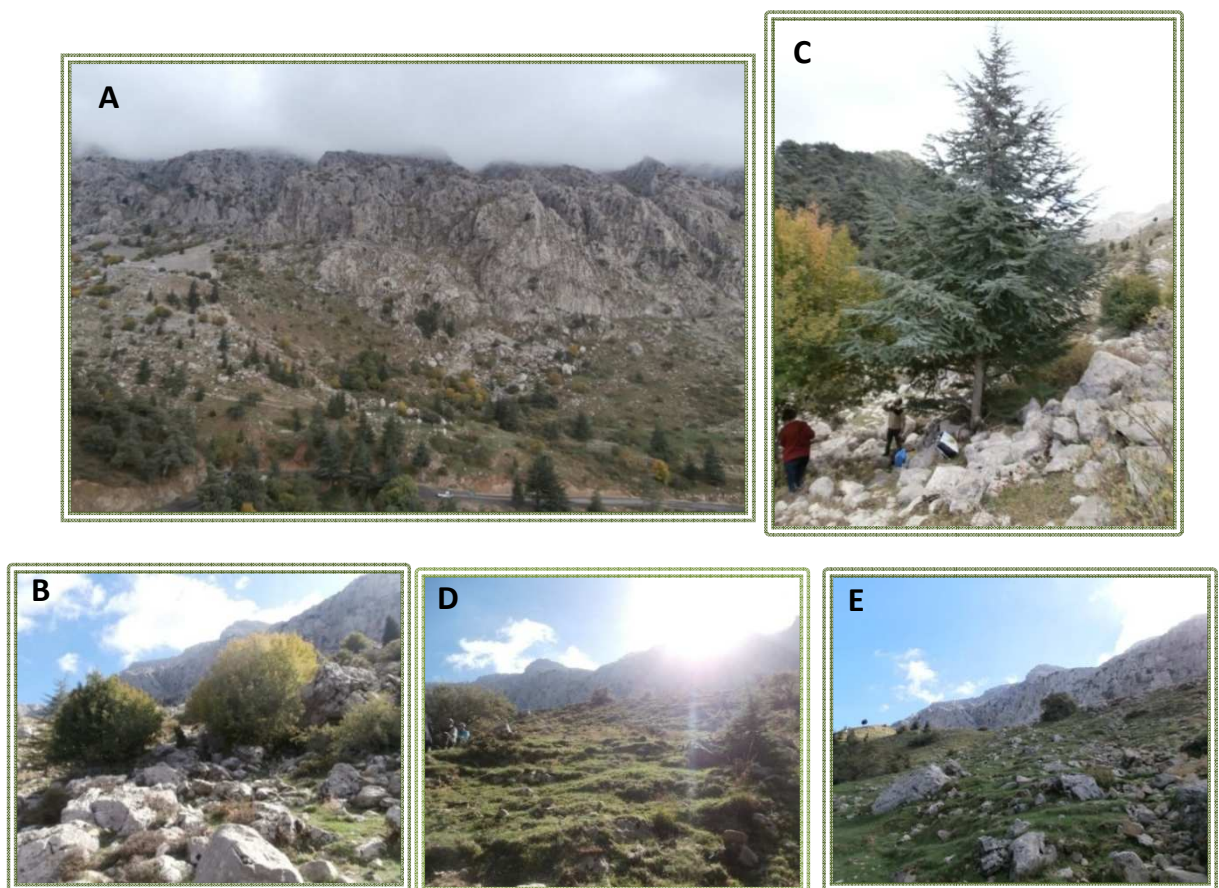


Figure 12 : Quelques photos du site Djamaa Adharchi: **A.** Vue globale sur Djamaa Adharchi ; **B.** Deux *A. monspessulanum* poussant sur la roche ; **C.** Individu de *Cedrus atlantica* isolé ; **D** et **E** Vue sur la pelouse écorchée parsemée de cailloux (Clichés Automne 2014).

1.2.2.b Description du Site de Ighzar Ikheradhen

C'est une station où domine le Cèdre, nous avons noté la présence de plusieurs espèces de sous-bois dont *Acer obtusatum*, *Ilex aquifolium*, *Quercus canariensis*, *Sorbus aria* et *Taxus baccata*. Ce dernier se maintient beaucoup plus sur le lit d'oued.

Au niveau de Ighzer Ikheradhen, nous retrouvons deux micro-stations à la même altitude mais à exposition différente l'une en plein Nord qui est une Cédraie haute à structure jardinée où les Cèdres dépassent 25m de haut. La forêt est y fermée et très ombragée et les Erables atteignent les hauteurs des jeunes Cèdres. Nous avons noté quelques semis d'Erable obtus (Fig.13.B) ainsi que la présence de plusieurs pieds de Houx (*Ilex aquifolium*), quelques chênes zeen (*Quercus canariensis*) et d'Alisier blanc (*Sorbus aria*).

La deuxième micro station est à exposition Nord-Est. Elle est plus chaude que la précédente et le couvert est moins dense. Nous retrouvons à peu près les mêmes espèces déjà notées, en plus de l'apparition de la Cytise, l'Asphodèle et 2 à 3 pieds d'Erables de Montpellier. Ces derniers sont petits et rabougris et se maintiennent sur la roche, quelques *Q. canariensis* sont également noté, et *S. aria* est retrouvé dans le lit d'oued.

Sur les 23 arbres échantillonnés, aucun n'a produit des samares en 2014 néanmoins nous avons retrouvé des vestiges de pédoncules probablement de l'année passées (2013) sur 05 arbres.

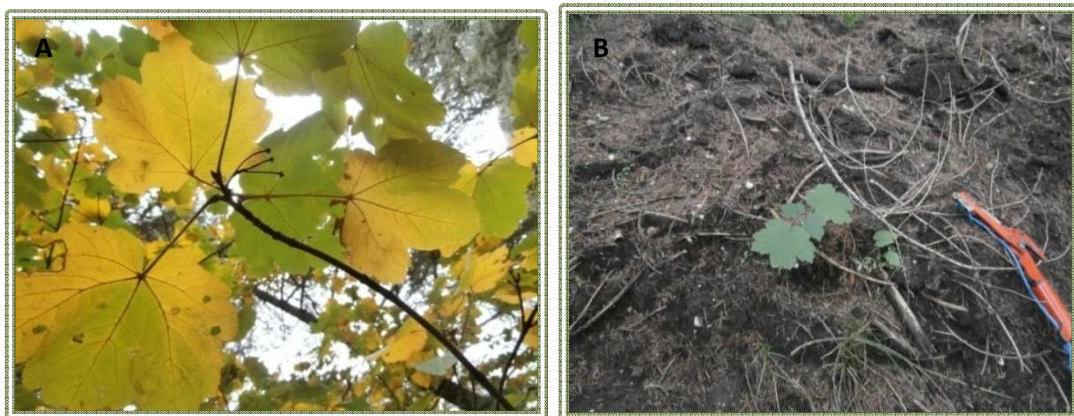


Figure 13 : Quelques photos d'*Acer obtusatum* : **A.** *A. obtusatum* avec des vestiges de pédoncule ; **B.** Semis d'*Acer obtusatum* (Clichés Novembre 2014).

Il est à noter que nous avons également échantillonné deux individus d'*A. obtusatum* au lieu-dit Chemin Royal à une altitude de 1585 m.

1.2.3. Description de la station de Taouialt

Située sur le versant Sud du Parc National du Djurdjura sur le Djebel Taouialt, elle est rattachée administrativement à la commune d'El Asnam, wilaya de Bouira. C'est une Cédraie à structure forestière multi strates à feuillus (*Ilex aquifolium*, *Acer obtusatum*, *Sorbus*

umbellata) (Meddour, 2010). Actuellement, le couvert est ouvert mais dans les années précédentes il était fermé avec un recouvrement de 70-80%.

La zone échantillonnée est à orientation Nord, la forêt de Taouialt a subi des incendies répétés en 2000, 2010 et 2012 (archives PND). La végétation reprend graduellement, nous avons noté plusieurs pieds d'hièbles (*Sambucus ebulus*), de chèvrefeuille (*Lonicera kabylica*), de fougères (*Pteridium aquilinum*), *lamium* sp., de l'absinthe (*Artemisia absinthium*) est retrouvée également dans les zones éclairées.

Nous avons sillonné cette forêt à partir de la piste à 1443 m jusqu'à une altitude de 1536 m, nous avons pu traverser trois micro-stations :

1) Une micro-station touchée par l'incendie où plusieurs Cèdres, Houx et quelques Erables obtus ont été brûlés soit entièrement ou partiellement. Nous avons remarqué plusieurs rejets de gourmands sur les Erables ainsi que la présence d'un semencier épargné par le feu. Ce dernier présente une production grainière importante.



Figure 14 : Quelques photos de la station de Taouialt : **A.** Vue générale sur la station de Taouialt; **B.** Vestige de l'incendie de 2012 ; **C.** Semis d'*A. obtusatum* ; **D.** Rameau d'*A. obtusatum* avec des samares ; **E.** : Rejets de *A. obtusatum* (Clichés Aout 2014).

2) Une micro-station avec un substrat rocheux, et présence de traces anciennes de feu. Nous avons noté la présence d'un individu d'Erable multibrins (11 brins) dont les diamètres atteignent 80 cm et qui semble être isolé depuis longtemps. L'envergure du houppier fait 10 m de diamètre. Nous avons noté la présence de *Phlomis boveii* et *Teucrium* sp.

3) La troisième micro-station représente une cédraie fermée à 1537 m d'altitude avec une bonne dynamique de végétation. Ce site a été épargné par le feu. Nous avons noté la présence de *Phlomis boveii*, *Cotoneaster racemiflora*.

Dans la parcelle que nous avons pu parcourir, nous avons retrouvé un seul semencier. Un grand individu de 15 m de haut, multibrins dont deux où l'un a une circonférence de 90 cm et l'autre 60 cm. Il présente une production importante de graines. Nous avons inventorié 15 semis dans un rayon de 10 mètres, installés à partir de 5 mètre et plus de l'individu mère. Nous avons également noté une distribution asymétrique des semis, qui étaient plus nombreux dans la partie ombragée par rapport à celle éclairée.

1.2.4 Description de la Station de Tigounatine

Nous avons parcouru le coté Est de la forêt de Tigounatine en dehors de la réserve, en partant du lit d'oued (1450 m) jusqu'à 1790m d'altitude. Nous avons retrouvé 4 individus de *Acer monspessulanum*. Ces derniers sont prosterés avec des branches lignifiées, leur hauteur n'excède pas 1 mètre. La présence de défections nous renseigne sur l'effet du pâturage. Nous avons retrouvé quelques individus d'*A. monspessulanum* enchevêtrés avec *Juniperus communis* (Fig.16). Nous n'avons pas échantillonnés au niveau de cette station.



Figure 15: Quelques photos d'*A. monspessulanum* dans la station de Tigounatine : **A.** Individus d'*A. monspessulanum* et *Juniperus communis* enchevêtrés ; **B.** Deux individus d'*A. monspessulanum* poussant sur la roche (Clichés Aout 2014).

2. Récolte du matériel végétal

L'échantillonnage des feuilles a été effectué sur plusieurs sorties sur terrain et au niveau de plusieurs stations. Le nombre d'arbres échantillonnés varie d'une espèce à l'autre et d'une station à une autre.

2.1. *Acer monspessulanum*

Comme nous l'avons cité précédemment, deux stations à *Acer monspessulanum* (Djamaa Adharchi et Ighzar Ikheradhen) ont été échantillonnées en Automne 2014. Nous avons échantillonné 15 arbres par station, sur lesquels nous avons récolté 2 rameaux de l'année sur chacun des 4 cotés cardinaux à raison de 3 paires de feuilles par rameau en notant le niveau d'insertion des feuilles : feuilles basales (F1), feuilles médianes (F2) et feuilles terminales (F3) (Fig.16).

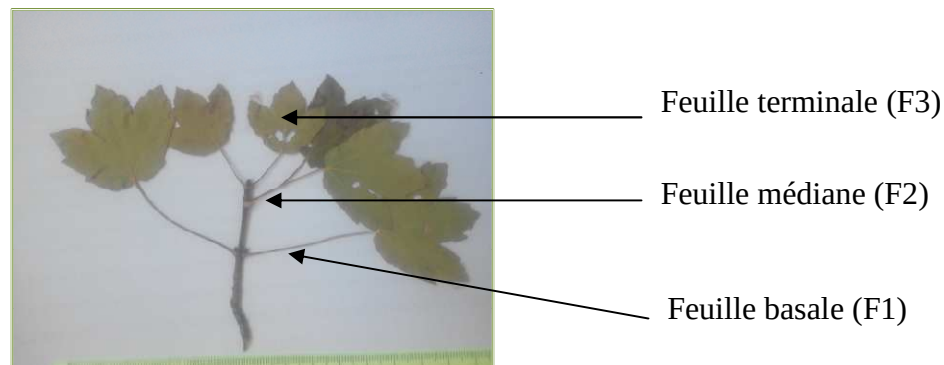


Figure 16 : Rameau de l'année d'*Acer monspessulanum*

2.2. *Acer obtusatum*

➤ Pour *Acer obtusatum*, le nombre d'arbres diffère par station. A Taouilet l'échantillonnage s'est effectué en Aout 2014. Nous avons inventorié 13 individus mais seuls 5 ont été échantillonnés. Malheureusement, nous n'avons pas pu retourner dans cette station pour continuer l'échantillonnage car les conditions sécuritaires n'y étaient pas favorables.

➤ Pour la station d'Ighzar Ikheradhen, l'échantillonnage a été réalisé en Novembre 2014. Nous avons échantillonné deux individus au niveau du Chemin royal, deux autres en contrebas de la route goudronnée menant vers la maison forestière et 21 individus à d'Ighzar Ikheradhen.

Du fait de la hauteur élevée des arbres, nous n'avons échantillonné que les rameaux inférieurs du houppier où 20 feuilles ont été récoltées sur chacun des 30 individus.

L'ensemble des feuilles récoltées ont été mises dans du papier journal puis pressées afin de les sécher pour procéder aux mesures.

3. Etude de la morphologie des feuilles

Une fois les feuilles séchées et pressées, nous les avons scannées sur leur face abaxiale avec un Scanner Epson Stylus SX100 avec une résolution de 300 dpi. Lors du scan nous avons inclus une feuille millimétrée pour la mesure de l'échelle. Nous avons effectué deux sortes de mesures : des mesures dites classiques où des mesures de distances, d'angles et de superficie ont été réalisées avec le logiciel Digimizer version 3.7; et des mesures de morphométrie moderne en utilisant la méthode morphométrique géométrique par points repères grâce aux logiciels TPS et Morpho J.

3.1. Mesures morphométriques classiques

3.1.1. *Acer monspessulanum*

Les mesures classiques ont été faites sur 3 paires de feuilles par rameau de l'année selon trois niveau d'insertion (F1 : feuilles basales ; F2 : feuilles médianes et F3 : feuilles terminales), sur 2 rameaux par orientation et 4 orientations par arbre. Sur chaque feuille 11 paramètres ont été mesurés (Tableau 3). Ce qui fait un total de 15840 mesures (2 stations x 15 arbres x 4 orientations x 2 rameaux x 3 niveaux d'insertion des rameaux x 2 feuilles par niveau). Des ratios ont été déduits à partir de ces variables mesurées.

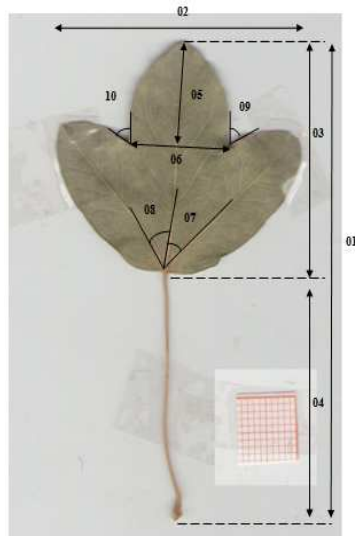


Figure 17 : Paramètres mesurés sur les feuilles d'*Acer onspessulanum*.

Tableau 3 : Variables mesurés sur les feuilles d'*Acer monspessulanum*

N°	Code	Paramètres
01	Lngf	Longueur de la feuille
02	Lrgf	Largeur de la feuille
03	LngL	Longueur du limbe
04	LngP	Longueur du pétiole
05	LngAp	Longueur du lobe apical
06	LrgAp	Largeur du lobe apical
07	AngLobD	Angle formé par la nervure principale, la Base du limbe et la nervure du lobe droit
08	AngLbG	Angle de la nervure principale, la Base du limbe et la nervure du lobe Supérieur
09	ASAPD	Angle du sinus formé entre le lobe apical et le lobe supérieur droit
10	ASAPG	Angle du sinus formé entre le lobe apical et le lobe supérieur Gauche
11	SF	Surface foliaire

3.1.2 *Acer obtusatum*

Pour cette espèce, un total de 15 variables a été mesuré sur 20 feuilles par arbre. La Figure 17 et le Tableau 4 montrent les variables mesurées sur les feuilles d'*A. obtusatum* et leur code correspondant.

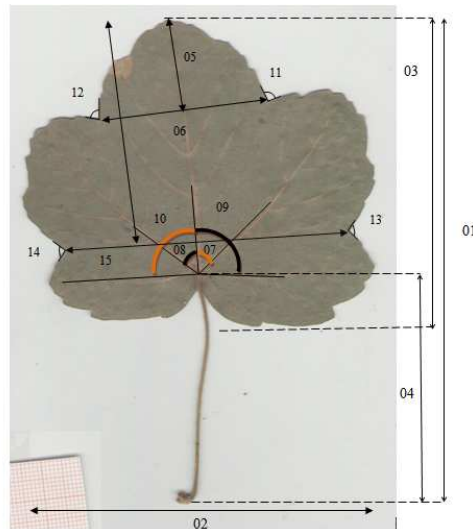


Figure 18 : Paramètres mesurés sur les feuilles d'*Acer obtusatum*.

Tableau 4 : Paramètres mesurés sur les feuilles d'*A. obtusatum*

N°	Code	Variables
01	Lngf	Longueur de la feuille
02	Lrgf	Largeur de la feuille
03	Ng	Longueur du limbe
04	LngP	Longueur du pétiole
05	LngAp	Longueur du lobe apical
06	LrgAp	Largeur du lobe apical
07	ABSD	Angle formé par la nervure principale, la base du limbe et la nervure du lobe Supérieur droit
08	ABSG	Angle formé par la nervure principale, la Base du limbe et la nervure du lobe Supérieur gauche
09	ABID	Angle de la nervure principale, la base du limbe et la nervure du lobe inférieur droit
10	ABIG	Angle de la nervure principale, la base du limbe et la nervure du lobe inférieur droit
11	ASAPD	Angle du sinus formé entre le lobe apical et le lobe supérieur droit
12	ASAPG	Angle du sinus formé entre le lobe apical et le lobe supérieur Gauche
13	ALSID	Angle formé entre lobe supérieur droit et lobe inférieur droit
14	ALSIG	Angle formé entre lobe supérieur droit et lobe inférieur gauche
15	DSL	Distance entre les sinus formé par les lobes supérieurs et lobes inférieurs

3.2. Mesures morphométriques modernes

Nous avons utilisé le même protocole pour l'étude de la conformation des deux espèces.

3.2.1. Protocole de mesure de la morphométrie géométrique

3.2.1.a. Préparation des échantillons

De toutes les feuilles scannées, nous avons choisi celles dont la marge n'est pas abîmée ou endommagée afin de minimiser les erreurs lors de la digitalisation des points repères. Et du fait que notre échantillonnage a été effectué en fin de saison, beaucoup de feuilles ont été écartées à cause de l'altération de leur marge.

Les fichiers images des feuilles scannées ont été classés et enregistrés de sorte que chacun ne comporte qu'une seule feuille avec une adresse spécifique exemple : Station1_Arbre01_Feuille01. Cette organisation est nécessaire car le logiciel TpsDig2 ne reconnaît qu'une seule feuille par fichier à cause de la nécessité de marquer le même nombre de PR représentant une seule conformation sur chaque feuille et dans chaque fichier.

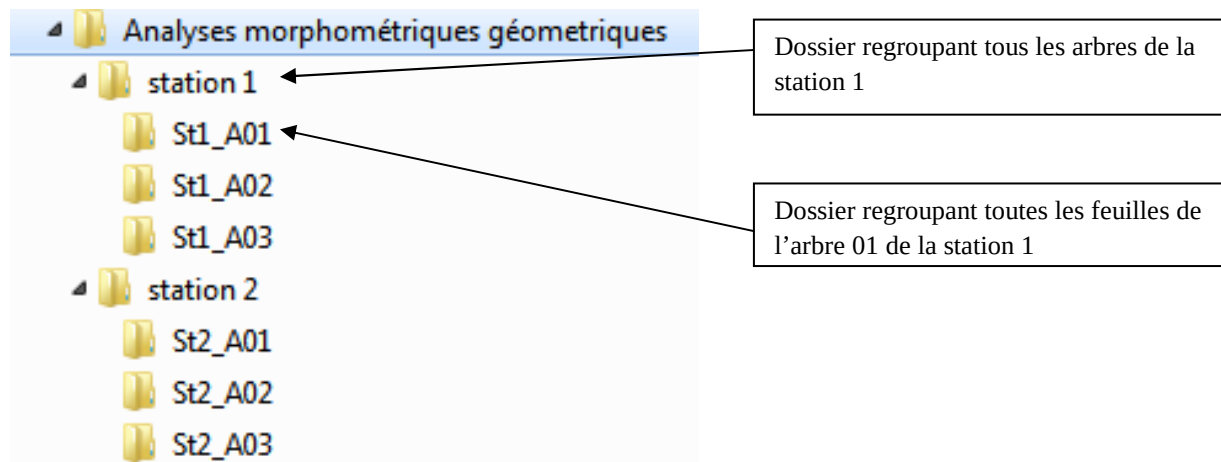


Figure 19 : Organisation des dossiers.

Les fichiers images sont ensuite classés dans des dossiers de façon que chaque dossier comporte toutes les feuilles d'un même arbre afin d'éviter les erreurs et pour une meilleure organisation (Fig.18).

3.2.1.b. Choix des points-repères

Pour analyser la conformation d'un objet, un choix minutieux doit être fait dans la sélection des points repères. Dans cette étude, nous nous sommes inspirés des travaux de Jensen *et al.*, (2002) sur les Erables de l'Amérique du Nord et de travaux sur d'autres espèces notamment les chênes (Viscosi *et al.*, 2009 ; 2010 ; Viscosi et Cardini, 2011).

b.1. *Acer monspessulanum*

Nous avons choisi les feuilles dont la marge n'a pas été endommagée. Pour cela nous avons opté pour le choix de 11 points repères numérisés sur 10-15 feuilles par arbre (Tableau 5).

Tableau 5 : Description des points repères choisis pour *A. monspessulanum*

N°PR	Description du point-repère	Type (Bookstein, 1991)
1	Extrémité du pétiole	III
2	Base du limbe	I
3	Point de la longueur maximale du limbe du côté droit	
4	Extrémité de la nervure principale du lobe inférieur droit	I
5	Base du sinus du lobe apical	II
6	Extrémité de la dent la plus saillante du côté droit du lobe apical	II
7	Apex du limbe	I
8	Extrémité de la dent la plus saillante du côté gauche du lobe apical	II
9	Base du sinus du lobe apical	II
10	Extrémité de la nervure principale du lobe supérieur gauche	I
11	Point de la longueur maximale du limbe du côté gauche	II

b.2. *Acer obtusatum*

Un choix de 15 points repères a été fait pour cette espèce, numérisée sur 8-15 feuilles par arbre (Tableau 6). La numérisation des points repères a été répétée deux fois pour extraire l'erreur de mesure.

Tableau 6 : Description des points repères choisis pour *A. obtusatum*

N°	Description du point-repère	Type (Bookstein, 1991)
1	Extrémité du pétiole	III
2	Base du limbe	I
3	Extrémité de la nervure principale du lobe inférieur droit	I
4	Base du sinus du lobe inférieur droit	II
5	Extrémité de la nervure principale du lobe supérieur droit	I
6	Base du sinus du lobe supérieur droit	II
7	Extrémité de la dent la plus saillante du côté droit du lobe apical	II
8	Sinus de la dent la plus saillante du côté droit du lobe apical	II
9	Apex du limbe	I
10	Sinus de la dent la plus saillante du côté gauche du lobe apical	II
11	Extrémité de la dent la plus saillante du côté gauche du lobe apical	II
12	Base du sinus du lobe supérieur gauche	II
13	Extrémité de la nervure principale du lobe supérieur gauche	I
14	Base du sinus du lobe inférieur gauche	II
15	Extrémité de la nervure principale du lobe inférieur gauche	I

3.2.1.c. Collecte des données

Avant d'entamer la collecte de données, c'est-à-dire la digitalisation des points repères, il faut créer un fichier TPS qui est essentiellement une liste de nos spécimens. Ce fichier est indispensable pour l'implantation des Point repères avec TpsDig2.

c.1. Création d'un fichier « .tps »

Puisque nous avons scannées toutes les feuilles avec la même résolution (300 dp) et que nous avons utilisé la même mesure de distance (1 cm), il a été donc préférable de classer les images que nous avons souhaité d'utiliser dans le même dossier. Cette étape n'est pas nécessaire mais elle est utile et évite les erreurs d'oublis ainsi qu'une perte de temps. En effet, au lieu de créer un fichier « .tps » pour chaque image, nous l'avons fait pour l'ensemble des images du même dossier. Pour cela, nous avons créé des dossiers et des sous-dossiers pour organiser et faciliter le travail comme nous l'avons montré dans la figure 18. Après ouverture du logiciel tpsUtil, une fenêtre s'affiche (Fig.19). Les étapes suivantes sont suivies :

Etape 1 : Cliquer sur sélectionner une opération « Select operation », une liste d'options se déroule, choisir alors « Build tps file » c'est-à-dire créer un fichier tps (Fig. 19.Etape 1).

Etape 2 : le bouton « Input » nous permet d'appeler le fichier d'entrée. Une fois celui-ci choisit, l'adresse du fichier sélectionné s'affiche dans « Data file = ? ». Si les images à importer sont enregistrées dans un seul dossier, la sélection d'une seule image suffit, le reste est importé automatiquement par tpsUtil.

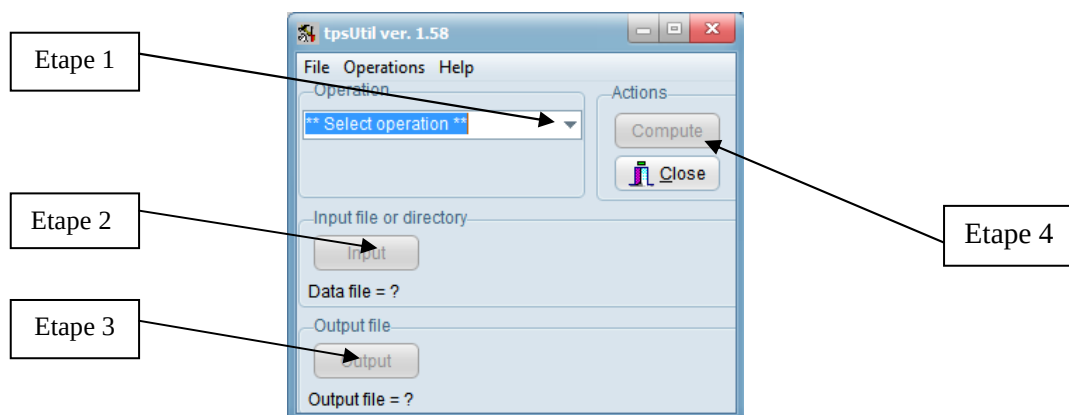


Figure 20 : Les étapes de création d'un fichier « .tps » avec le logiciel TpsUtil.

Etape 3 : Cliquer sur « Output » pour créer un fichier de sortie à extension « .tps » et le nommer. Il est recommandé d'enregistrer le fichier de sortie dans le même dossier que le fichier d'entrée.

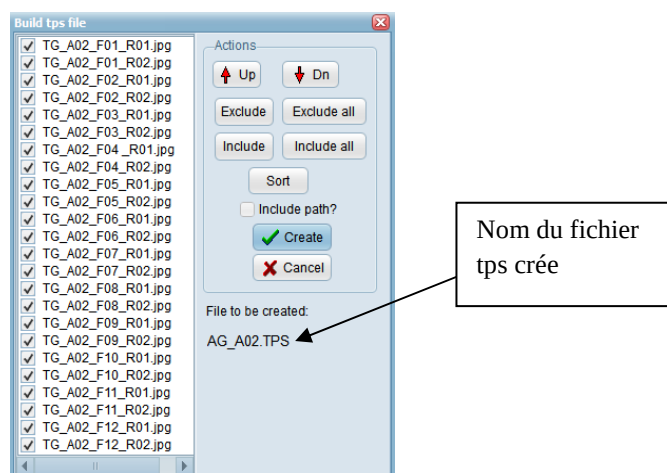


Figure 21 : Aperçu d'un fichier « .tps » crée.

Etape 4 : le bouton « Compute » est remplacé par « Setup », cliqué sur ce dernier. Une fenêtre s'affiche alors, avec l'adresse de tous les fichiers images sélectionnés (Fig.20).

Lors de cette étape, nous pouvons vérifier les fichiers images sélectionnés. Si nous souhaitons exclure quelques images pour ne pas les analyser, nous pouvons les décocher ou cliquer sur « Exclude ». Une fois les images vérifiées, cliqué sur « Create » pour créer le fichier tps.

Une fois que le fichier « .tps » a été créé, nous avons procédé à la digitalisation des Points repères avec TpsDig2.

c.2. Digitalisation des points repères

Une fois TpsDig2 ouvert, nous avons appelé le fichier « .tps » créé. Les étapes de digitalisation avec le logiciel tpsDig2 ont été bien détaillées par Lateb (2014), il est donc inutile de les reprendre ici. Néanmoins, la Figure 21 montre une fenêtre de tpsDig2 avec les principales options.

Une fois l'étape de digitalisation terminée, il est possible d'analyser les fichiers tps avec plusieurs logiciels dont MorphoJ, mophoR, ImageJ.... etc. Le logiciel que nous avons utilisé pour nos analyses est MorphoJ version 1.06 (Klingenberg, 2005).

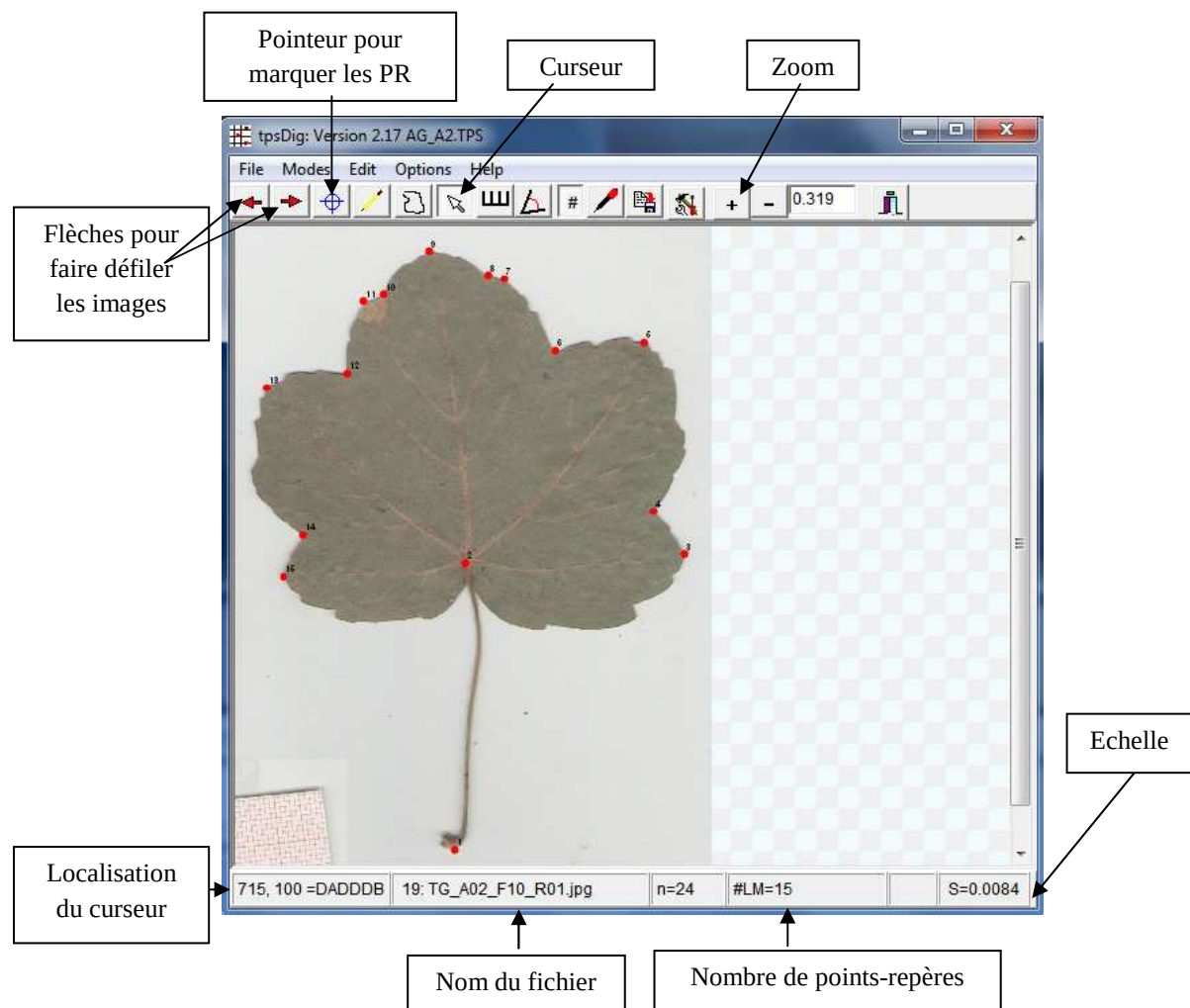


Figure 22 : Interface graphique du logiciel tpsDig2.

3.2.1.d. Vérification des données

Une fois les données récoltées, il faut procéder à des analyses préalables pour vérifier la compatibilité et les éventuelles erreurs de digitalisation.

3.2.1.e. Approximation de l'espace tangent à l'aide de TpsSmall

La projection dans l'espace tangent est effectuée car les méthodes statistiques standards telles que la régression, l'analyse de la variance et beaucoup d'autres analyses exigent généralement que les données soient dans un espace Euclidien plat. Cela signifie que la distance entre deux observations est une ligne droite calculée en utilisant le théorème de pythagore (ou son extension). Cependant, parce que l'Espace de conformation de Procruste est courbé, elle doit être approchée par un espace Euclidien tangent en utilisant une projection calculée comme le ferait un cartographe pour dessiner la surface courbée de la Terre sur une carte plane (Viscosi et Cardini, 2011). TpsSmall est un logiciel développé par Rohlf (2003), « small » fait référence à la quantité de variation de la conformation dans un ensemble de données. Ce test est très utile afin de vérifier si ladite variation est suffisamment petite pour permettre la réalisation d'analyses statistiques des données dans la tangente approximation linéaire de l'espace de forme de Kendall.

3.2.1.f. Analyse des valeurs aberrantes

La première étape à réaliser sous MorphoJ, est la vérification des données et l'élimination des données aberrantes. En effet, il est possible que des erreurs d'inattention se soient glissées lors de la digitalisation. Notamment la digitalisation de points repères interchangés.

3.2.1.g. Analyses de la conformation

Après les superpositions de Procruste sous Morpho J (version 1.06d), des analyses statistiques (ANOVA, ACP) sont réalisées. Ce logiciel nous permet une visualisation instantanée des résultats sous forme de graphes.

Chapitre 4

Présentation des résultats et discussion

1. Analyse des mesures morphométriques classiques pour *Acer monspessulanum*

Les résultats montrent qu'il y a une grande variabilité selon les facteurs : station (St) ; arbre (Arb) et niveau d'insertion des feuilles sur le rameau (Niv), alors que le facteur exposition (Exp) semble ne pas influencer sur les variables mesurées. De ce fait, les données ont été examinées sans tenir compte de ce dernier.

Compte tenu de la quantité de données obtenues, (2 stations x 15 arbres x 4 orientations x 2 rameaux x 3 niveaux d'insertion des rameaux x 2 feuilles par niveau x 11 paramètres), seuls quelques paramètres sont présentés dans cette présente étude.

1.1. Variabilité inter-stationnelle

Le Tableau 7 et 8 montrent la moyenne et le coefficient de variation (%) de quelques caractéristiques des variables quantitatives mesurées pour la feuille d'*Acer monspessulanum*.

Nous notons que la longueur des feuilles varie fortement selon le niveau d'insertion sur le rameau (Fig.23a). Les feuilles basales (Iff.f1 et TG.f1) sont les plus longues (6,21 cm) et les feuilles terminales (Iff.f3 et TG.f3) les plus petites (3,02 cm) alors que les feuilles médianes (Iff.f2 et TG.f2) ont des valeurs intermédiaires (5,00 cm). Nous notons également que la longueur des feuilles est légèrement plus grande à TG. Pour la largeur, la tendance est respectée pour le niveau d'insertion des feuilles et la station (Fig.23b).

Le ratio de la longueur de la feuille sur sa largeur (RLL) montre en moyenne des valeurs supérieures à 1 indiquant que la largeur des feuilles est aussi longue que sa longueur. Le ratio chez les feuilles basales (f1) est égal à 1,50 montrant que la feuille est plus longue que large alors que chez les feuilles terminales (f3) la longueur est égale à la largeur (Fig.23c).

Le ratio longueur du limbe sur longueur du pétiole (RLP) est inférieur à 1 pour les feuilles basales (0,80), proche de 1 pour les feuilles médianes et atteignant 1,5 pour les feuilles terminales. Ceci nous indique que chez les feuilles terminales le limbe est plus grand que le pétiole, alors que chez les feuilles basales il est plus court que le pétiole (Fig.23d).

Le ratio longueur du lobe apical sur sa largeur (RLA) est supérieur à 1 pour tous les niveaux d'insertion des feuilles au niveau de la station Azrou n'Thor (Iff) avec des valeurs légèrement plus petites chez les feuilles basales (1,05) par rapport aux feuilles terminales (1,18) nous renseignant que la longueur du lobe apical est proche de sa largeur (Fig.23e). Ce rapport s'inverse à TG où on retrouve des valeurs inférieures à 1 hormis chez les feuilles terminales où RLA est proche de 1.

La surface foliaire (SF) augmente le long du rameau selon le niveau d'insertion des feuilles quelques soit la station (Fig.23f). On note que SF est plus grande à Tala Guilef (TG) qu'à Azrou N'thor (Iff) d'environ 1 cm² avec respectivement 7,57 contre 6,38 cm² pour les feuilles basales ; 6,28 contre 5,05 cm² pour les feuilles médianes et 3,18 contre 2,40 cm² pour les feuilles terminales.

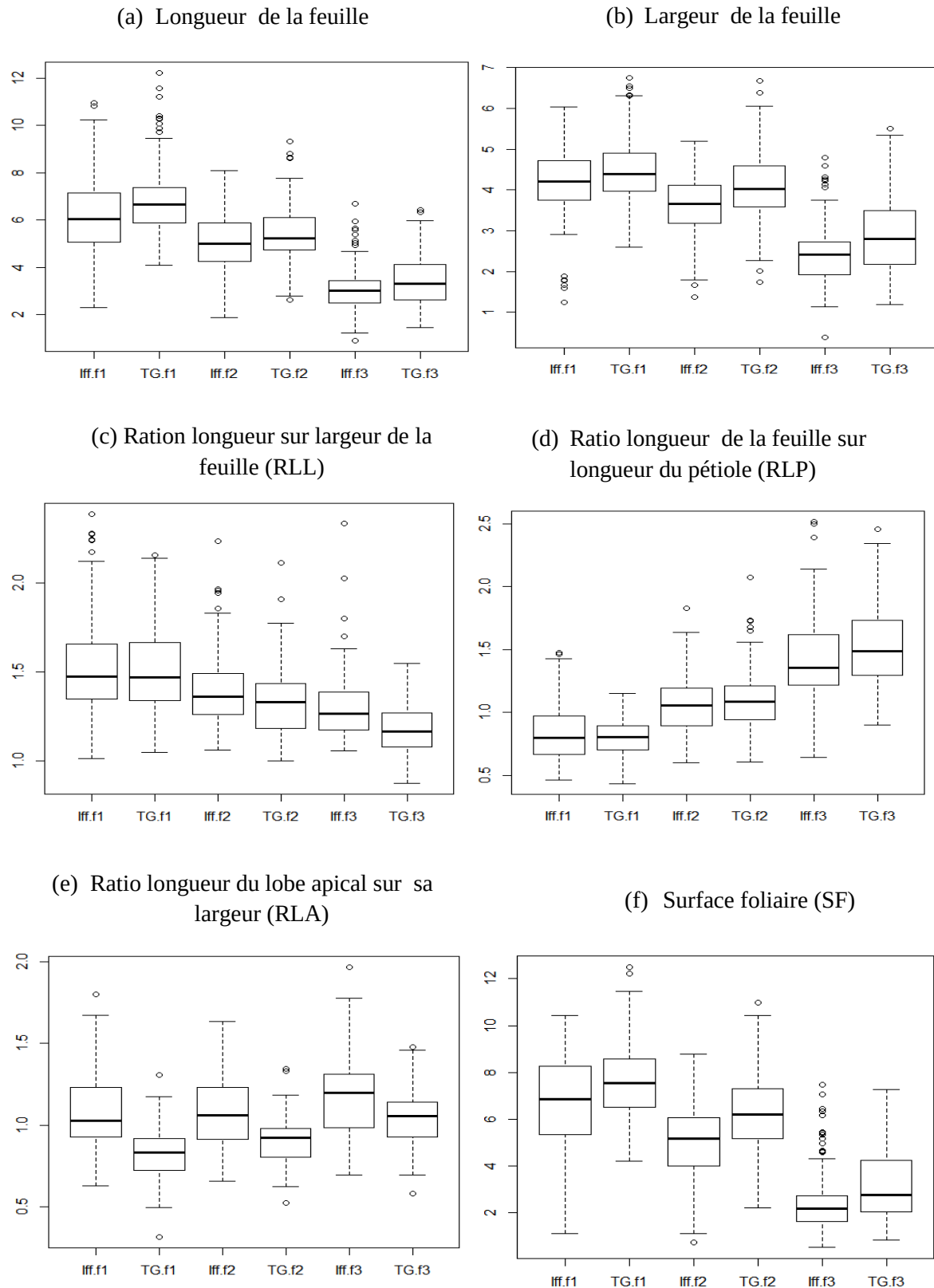


Figure 23 : Boite à moustache montrant la variabilité de quelques paramètre et ratios selon le niveau d'insertion des feuilles et de la station.

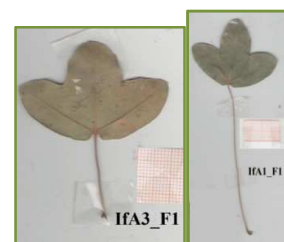
Tableau 8 : Paramètres statistiques sur les caractères quantitatifs mesurés sur la feuille d'*Acer monspessulanum* selon les stations

St	Niv	Lngf (cm)	Lrgf (cm)	RLL	LngL (cm)	LngP (cm)	RLP	LngAp (cm)	LrgAp (cm)	RLA	SF (cm ²)
Azrou n'Thor (Iff)	f1	6,21 (19.02%)	4,25 (17.3%)	1,53 (15.8%)	2,86 (20.5%)	3,69 (30.6%)	0,84 (18.9)	1,44 (25.0%)	1,40 (22.7%)	1,05 (22.4%)	6,58 (24.6%)
	f2	5,00 (23.7%)	3,57 (20.2%)	1,40 (12.4%)	2,65 (30.3%)	2,63 (20.2%)	1,05 (19.8%)	1,37 (35.1%)	1,32 (32.8%)	1,06 (18.7%)	5,05 (30.5%)
	f3	3,02 (32.1%)	2,36 (32.3%)	1,29 (14.6%)	1,84 (30.6%)	1,38 (40.3%)	1,43 (39.9%)	1,33 (35.1%)	0,92 (36.4%)	1,18 (26.5%)	2,40 (42.8%)
Tala Guilef (TG)	f1	6,77 (14.5%)	4,51 (15.9%)	1,50 (13.6%)	3,19 (23.4%)	4,10 (25.6%)	0,80 (16.4%)	1,87 (26.8%)	1,87 (23.2%)	0,80 (20.7%)	7,57 (21.0%)
	f2	5,42 (19.2%)	4,08 (16.8%)	1,33 (13.0%)	3,03 (25.6%)	2,88 (22.9%)	1,09 (23.7%)	1,53 (31.7%)	1,77 (29.2%)	0,89 (20.3%)	6,28 (27.6%)
	f3	3,39 (25.6%)	2,89 (30.0%)	1,17 (16.5%)	2,27 (33.2%)	1,59 (39.2%)	1,54 (34.6%)	1,35 (38.2%)	1,30 (27.9%)	1,04 (23.3%)	3,18 (30.5%)

1.2. Variabilité inter-arbre

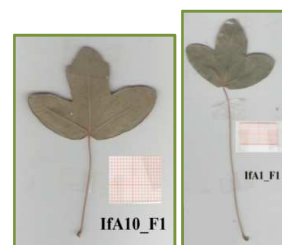
Compte tenu de la morphologie des feuilles le long du rameau, on peut conclure qu'il existe une ontogénie chez l'érable de Montpellier. C'est-à-dire que les feuilles changent de morphologie au cours de leur croissance. Nous pouvons alors considérer que la croissance des feuilles basales est plus accomplie que celle des feuilles terminales. Pour cela, Nous avons voulu étudier la variabilité morphologique inter arbres des feuilles basales (niveau d'insertion f1). Les résultats sont exposés dans le Tableau 8. Nous notons une forte variabilité entre arbres pour les variables étudiées.

➤ Pour le rapport longueur de la feuille sur sa largeur (RLL), tous les arbres ont enregistré des valeurs supérieures à 1 indiquant qu'ils possèdent des feuilles en moyenne plus longues que larges. Les valeurs de ce rapport fluctuent par arbres entre 1,26 (IfA3) et 2,03 (IfA1) indiquant que la feuille peut être au maximum deux fois plus longue que large.



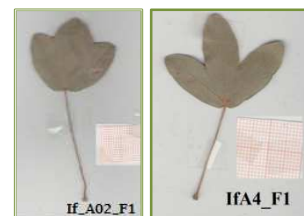
A : Ratio longueur du de la feuille sur sa largeur (RLA)

➤ Le ratio longueur du limbe sur longueur du pétiole (RLP) varie de 0,57 indiquant que le limbe est deux fois plus court que le pétiole (IfA01) à 1,05 (IfA10) où les longueurs semblent égales.



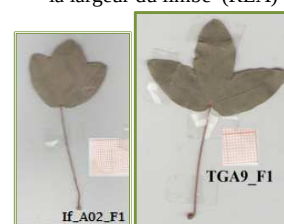
B : Ratio longueur du limbe sur longueur du pétiole (RLP)

➤ Le rapport longueur du lobe apical sur sa largeur (RLA) varie fortement entre arbres. On note qu'il est de 0,59 (TGA2) indiquant que la largeur du lobe apical est environ deux fois plus grande que sa longueur. Ce rapport s'inverse et atteint 1,3 (IfA4) où la longueur du lobe apical est plus grande que sa largeur.



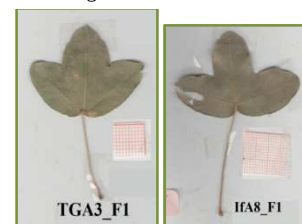
C : Ratio longueur du lobe apical sur la largeur du limbe (RLA)

➤ Le rapport de la longueur du lobe apical sur la longueur totale du limbe varie de 36,1% (IfA2), nous indiquant que la longueur du lobe apical forme 1/3 de la longueur totale du limbe, à 66,26% (TGA9) où la longueur du lobe apical est 2/3 la longueur du limbe.



D : Ration longueur du lobe apical sur longueur totale du limbe

➤ L'angle formé par la nervure du lobe latéral avec la nervure du lobe apical (AngLob) varie de 45.35° chez TGA3 à 69.46° chez IfA8.



E : Angle formé par la nervure du lobe latéral avec la nervure du lobe apical

Figure 24 : Illustration des caractères foliaires selon quelques arbres.

1.3. Corrélation entre les caractères mesurés

Plusieurs caractères sont corrélés entre eux, nous notons : la longueur de la feuille et sa largeur ($r=0,88$) ; la longueur du limbe et la longueur du pétiole ($r=0,81$) ; la longueur du limbe et la longueur du lobe apical ($r=0,88$) ; la largeur du lobe apical et sa longueur ($r=0,88$) et la largeur du limbe et la surface foliaire (0,85).

2. Analyse des mesures de la morphométrie moderne pour *Acer monspessulanum*

2.1. Vérification des données

2.1.1. Approximation de l'espace tangent avec TpsSmall

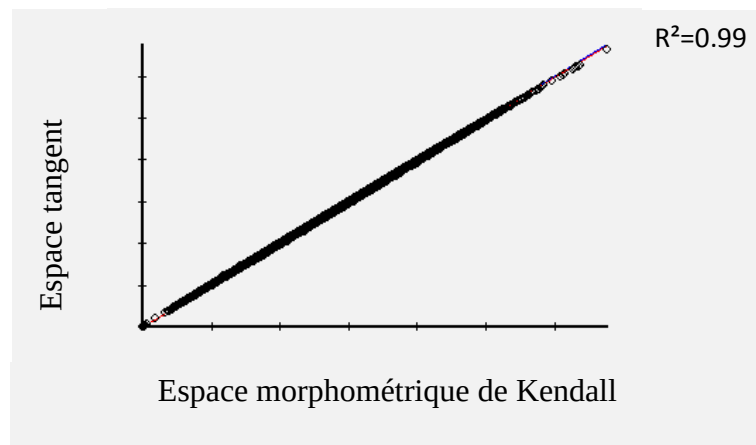


Figure 25 : Courbe de régression entre l'espace de Kendall et l'espace tangent.

L'approximation de l'espace tangent (Fig.25) donne une droite de régression de 0.993 avec une corrélation avoisinant 1 (0.999). La moyenne des distances de conformation de Procruste est de 0.138 et le maximum est de 0.362. Ces résultats nous montrent que l'approximation est excellente, nous sommes donc en mesure d'appliquer les autres analyses.

2.1.2. Vérification des valeurs aberrantes

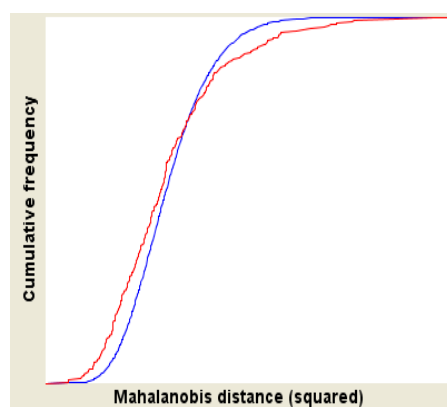


Figure 26 : Diagramme de distribution cumulative des distances des échantillons individuels et de la forme moyenne de l'échantillon complet.

Les données « en rouge » sur la figure 26 ne sont pas éloignées de la distribution normale indiquée par les données « en bleu », nous pouvons alors conclure qu'il y a absence de valeurs aberrantes et que les données suivent une distribution normale.

2.2. Superposition de Procruste

Après la superposition de Procruste dans MorphoJ, nous obtenons le graphe illustré par la figure 27.

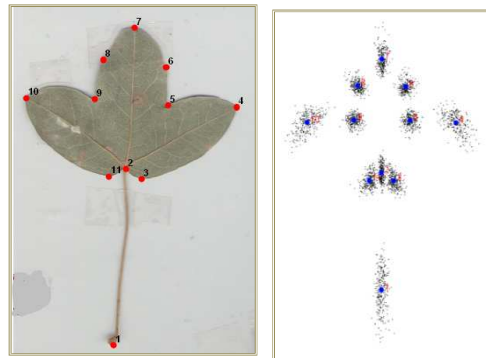


Figure 27: Résultat de la superposition de Procruste.

Les points repères consensus, montrés en bleu sur la figure 43, sont chacun entourés d'un nuage de points représentant les différentes coordonnées de tous les spécimens. Les points avec un nuage compact et sombre nous renseignent qu'ils ont des coordonnées rapprochées alors qu'un nuage étalé et diffus nous indique que les points s'éloignent du consensus.

2.3. Résultats de l'ANOVA pour *A. monspessulanum*

Pour analyser la variation morphologique des feuilles entre stations, entre arbres, entre niveaux d'insertion des feuilles sur le rameau (à l'intérieur de l'arbre) et entre feuilles d'un même niveau d'insertion, nous avons utilisé une analyse hiérarchique de la variance (ANOVA). Les résultats sont exposés dans le Tableau 9 et 10.

Tableau 9 : Résultat de l'analyse hiérarchique de la variance pour la taille du centroïde pour *A. monspessulanum*

	%	SS	MS	df	F	P
Station	0.27	2.959	2.959	1	0.25	0.62
Arbre	30.48	330.86	11.40	29	14.17	<0.0001
Niveau d'insertion des feuilles	53.06	576.50	6.472	89	8.04	<0.0001
Feuille	4.35	47.50	0.85	59	0.98	0.52
Résidus	1183	128.48	0.823	186	/	/
Total	100	1085.48				

SS: Sum of Squares (Somme des carrés); MS: Mean of Sum Squares (carré moyen); df: degree of freedom (ddl).

Tableau 10 : Résultat de l'analyse hiérarchique de la variance de la conformation pour *A. monspessulanum*

	%	SS	MS	df	F	P
Station	2.56	0.185	0.010	18	3.33	<0.0001
Arbres	22.29	1.609	0.003	522	4.53	<0.0001
Niveau d'insertion des feuilles	44.47	3.210	0.002	1602	2.94	<0.0001
Feuille	10.00	0.722	0.0006	1062	1.22	<0.0001
Résidus	20.67	1.492	0.0005	2808	/	/
Total	100	7.218				

SS: Sum of Squares (Somme des carrés); MS: Mean of Sum Squares (carré moyen); df: degree of freedom (ddl).

A partir du Tableau 9, on note que le facteur « station » est non significatif ($p\text{-value} > 0.05$) et n'influe pas sur la variation de la taille des feuilles. Le facteur « arbre » est très hautement significatif et explique 30% du total de la somme des carrés. Le « niveau d'insertion des feuilles » est également très significatif ($p\text{-value} < 0.0001$) et explique la plus grande part de la variation soit 53% du total de la somme des carrés. La variation de la taille des feuilles au sein d'un niveau est statistiquement non significative même si elle explique 4% du total de la somme des carrés. Les résidus sont élevés et expliquent 11% du total de la somme des carrés.

Pour ce qui est de la conformation (Tableau 10), les résultats concordent en majorité avec ceux obtenus pour la taille du centroïde. La variation selon la « station » est petite (2.56%) mais est statistiquement significative ($p\text{-value} < 0.001$), la variation selon l'« arbre » est assez importante (22.29%) mais reste plus faible que la variation entre niveaux d'insertion le long d'un rameau d'un même arbre (44.47%). La variation de la conformation des feuilles au sein d'un même niveau d'insertion est statistiquement significative et explique 10% du total de la somme des carrés. Les résidus restent élevés et expliquent 20.67% de la variation.

2.4. Résultat de l'ACP pour *A. monspessulanum*

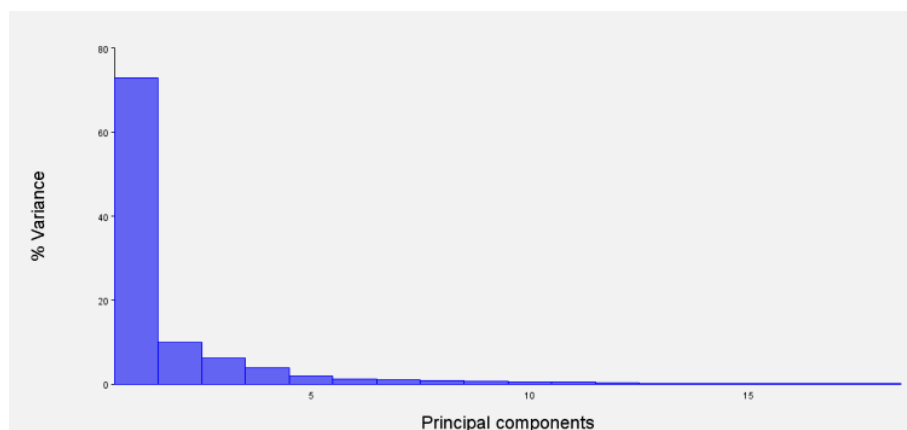


Figure 28 : Pourcentage de variation des axes en composantes principales.

Les résultats de l'ANOVA montrent qu'il existe plus de variation morphologique chez les feuilles issues de différents niveaux d'un rameau d'un arbre qu'entre arbres. Il existe ainsi une forte justification pour mettre en commun les feuilles d'un même niveau et utiliser leur moyenne comme une estimation de la tendance sous forme de feuille de chaque niveau d'un rameau.

La figure 29 indique que l'axe 1 de l'ACP explique 73% de la variation à lui seul. Les trois premiers axes cumulés expliquent plus de 88% de la variation totale. De ce fait, seuls ces derniers seront pris en compte pour la suite des analyses.

Selon la première composante, les feuilles terminales (F3) s'opposent aux feuilles basales (F1), alors que les feuilles médianes semblent se localiser entre les deux groupes et se concentrent au centre du graphe. Les différences morphologiques de ces conformations sont mises en évidence dans le graphe morphologique « Shape Graph » (Figure 49). Selon la deuxième composante de l'ACP, nous retrouvons les feuilles de différents niveaux appartenant au même arbre le long de l'axe qui oppose plutôt les arbres des deux stations. On note qu'il n'y a pas une distribution des arbres conformément à leur station d'origine et qu'on retrouve des arbres de différentes conformations dans la même station.

La troisième composante principale sépare les arbres des deux stations comme montré plus clairement dans les Figures 31 et 32. Nous remarquons néanmoins, que quelques arbres de la station d'Iffarhounene s'isolent de leur groupe et auraient une conformation proche des arbres de Tala Guilef notamment l'arbre 02 et les feuilles terminales des arbres 01, 13 et 15.

2.4.1. Changement de conformation dans le premier axe

L'axe 1(**fig.33**) met en évidence un gradient entre deux types de conformations. La variation de la conformation est donnée par deux modes de visualisation : **a** « transformation grid » et **b** « wireframe graph ».

A partir des graphes (**a1** et **b1**) ressortent des conformations représentant des feuilles à :

- Pétiole très long ;
- Limbe étroit ;
- Angle formé par les nervures des lobes latéraux étroit;
- Lobe apical petit et étroit occupant 1/3 de la longueur du limbe ;
- Angle d'insertion du lobe apical plus étroit.



Ces caractéristiques renvoient à la conformation à droite de l'axe 1 de l'ACP et correspondent à la conformation des feuilles du niveau 1 c'est-à-dire les feuilles basales.

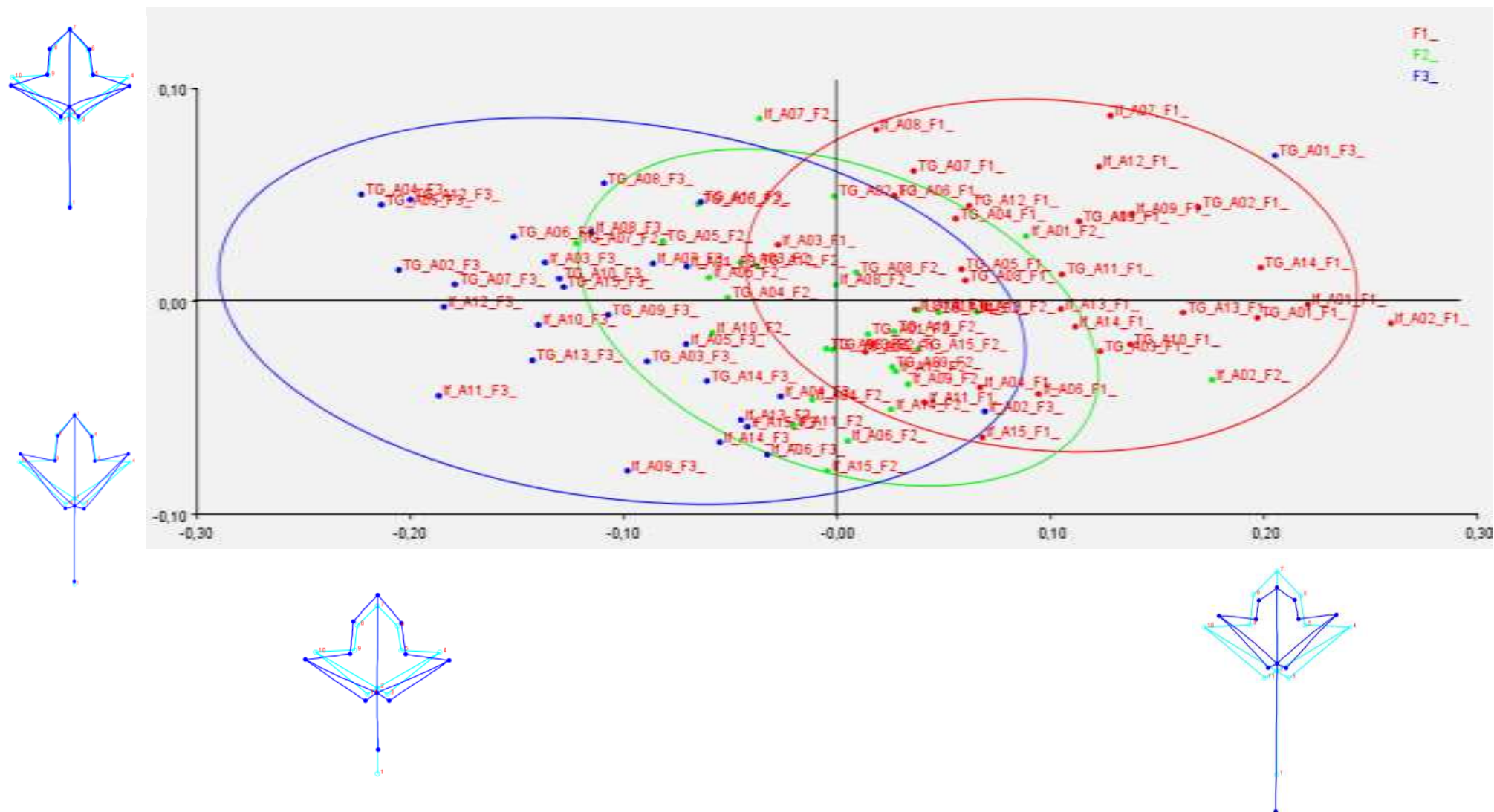


Figure 29 : Projection des individus et des niveaux d'insertion des feuilles selon les deux premières composantes principales.

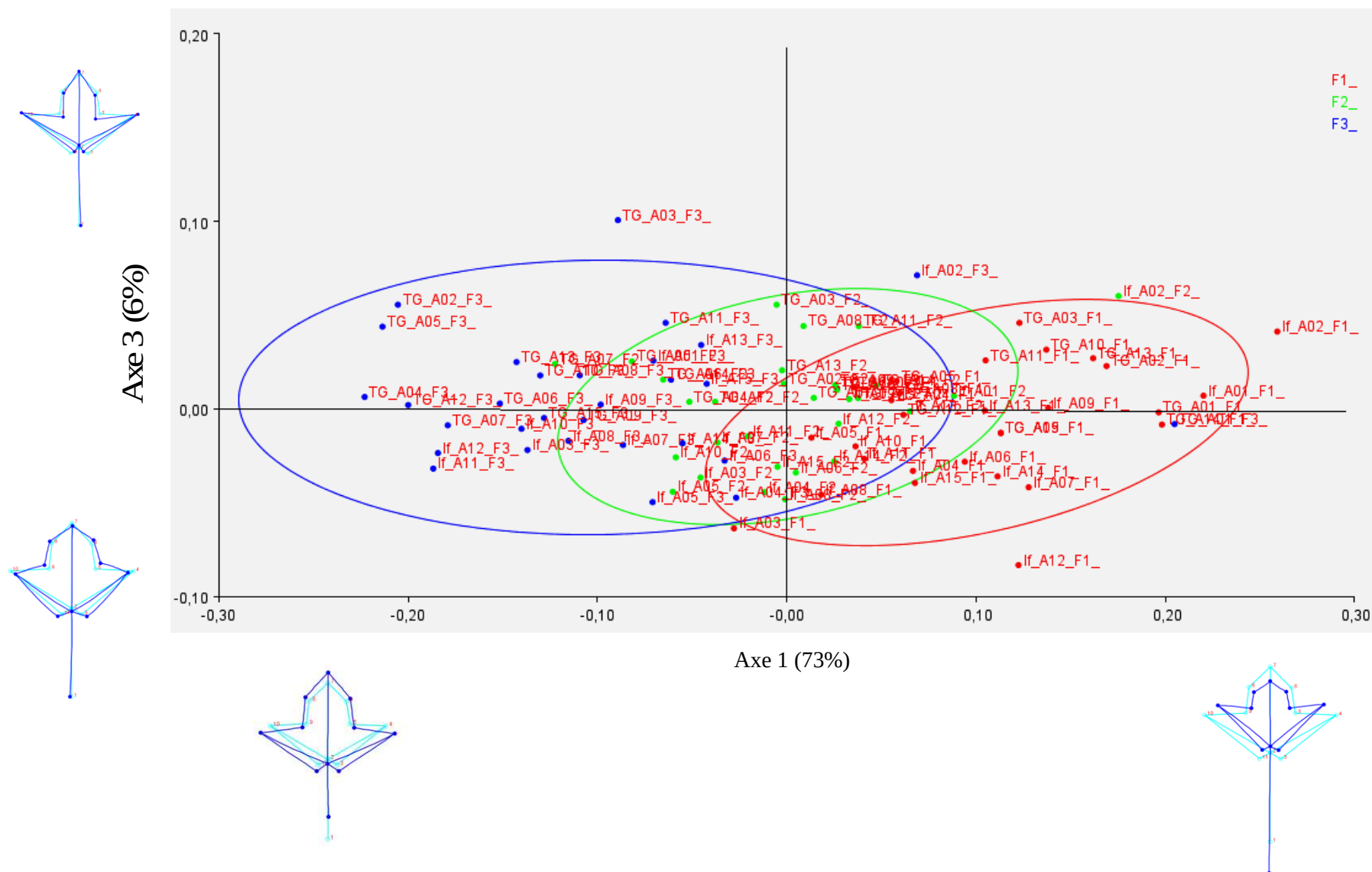


Figure30 : Projection des individus et des niveaux d'insertion des feuilles selon la première et la troisième composante principale.

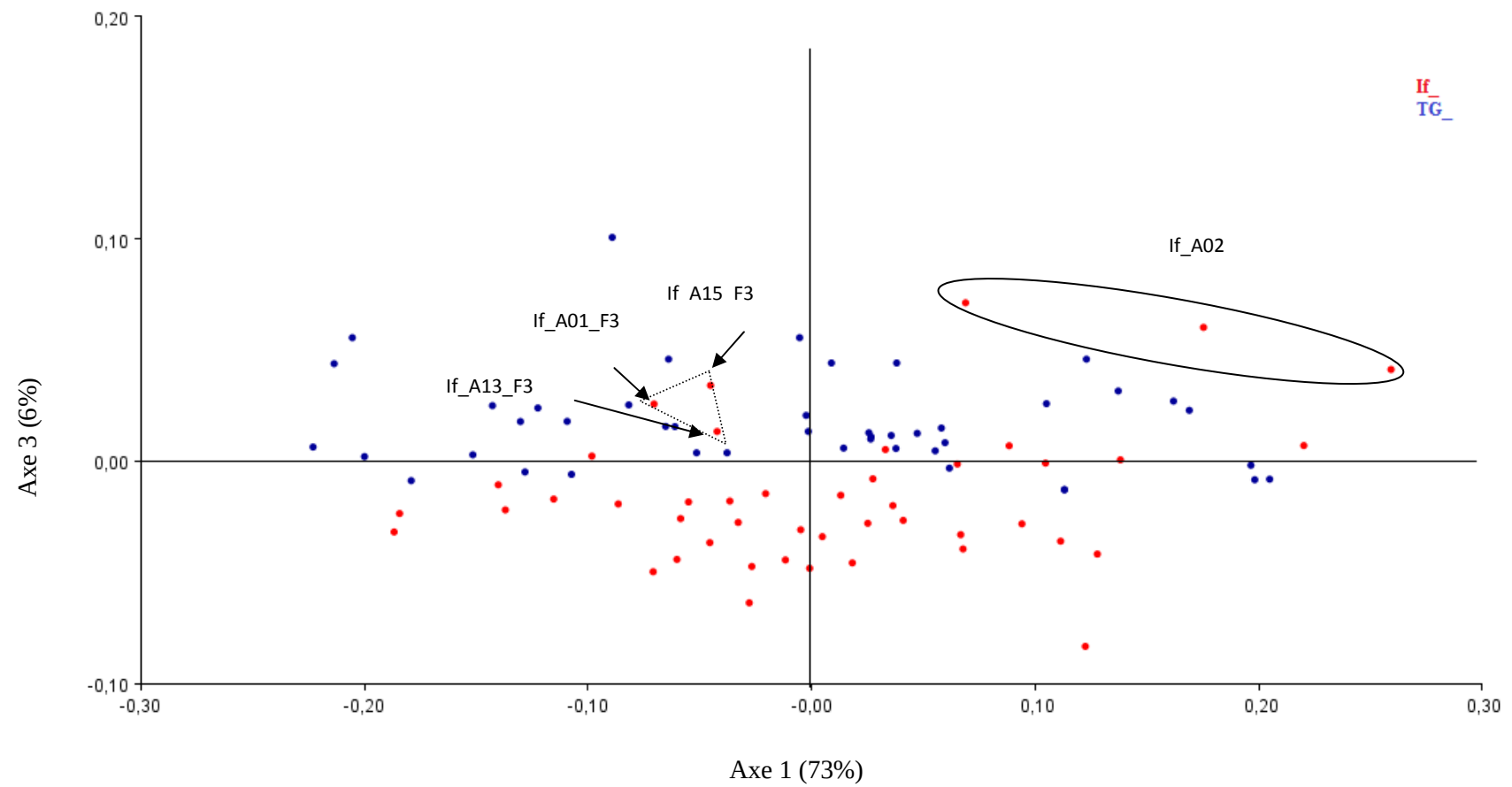


Figure 31 : Projection des individus et des niveaux d'insertion des feuilles dans le plan 1-3 et mise en évidence des arbres selon les stations.

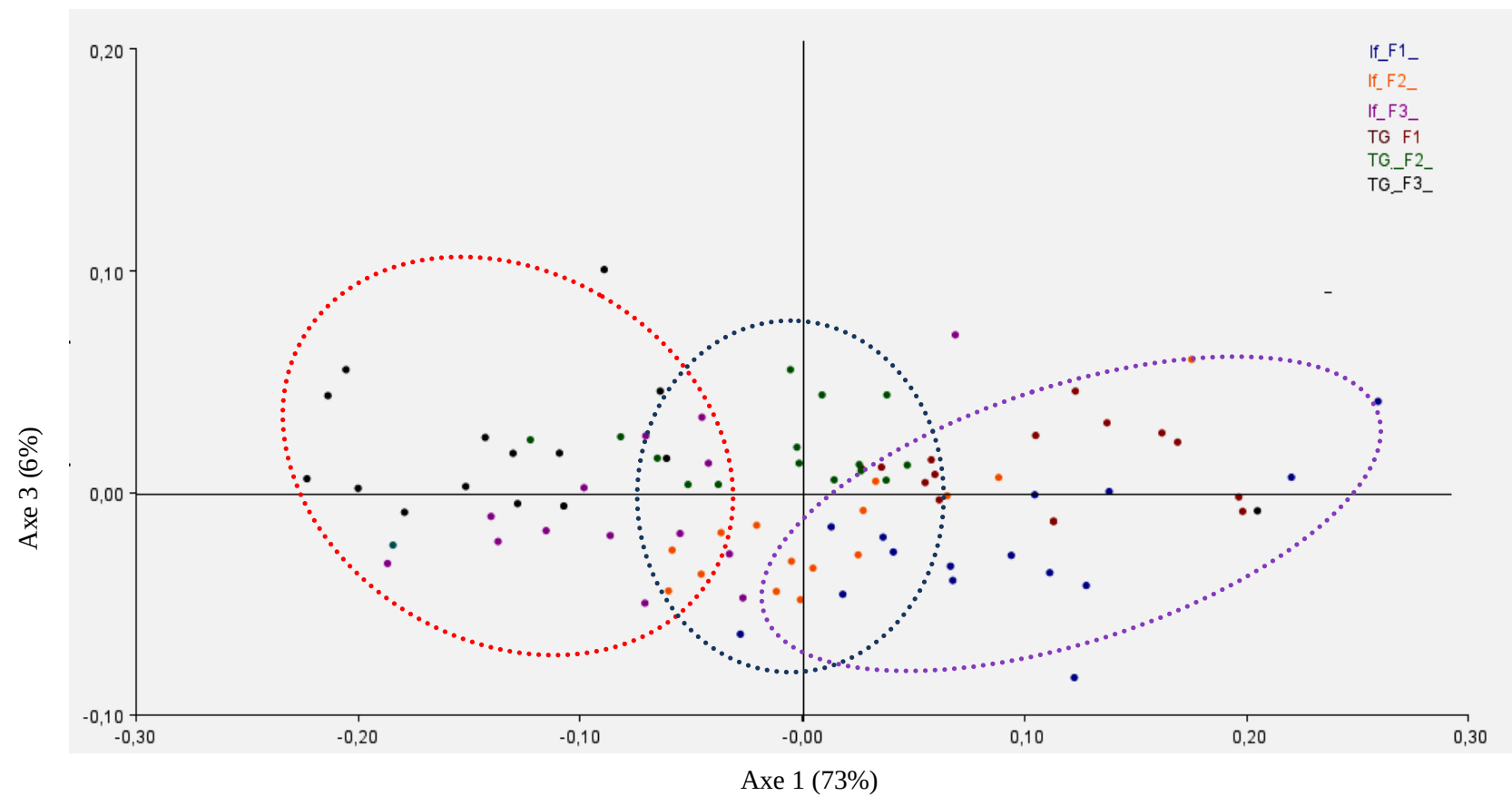


Figure 32 : Projection des individus dans le plan 1-3 et mise en évidence des arbres selon les stations et le niveau d'insertion des feuilles sur le rameau

Les graphes **a2** et **b2** mettent en évidence des conformations représentant des feuilles à :

- Pétiole très court ;
- Limbe très large ;
- Angle formé par les nervures des lobes latéraux très grand ($>90^\circ$) ;
- Lobe apical plus long et plus large, occupant la moitié de la longueur du limbe ;
- Angle d'insertion du lobe apical plus large.



Ces caractéristiques renvoient à la conformation à gauche de l'ACP, correspondent à la conformation des feuilles du niveau 3 c'est-à-dire les feuilles terminales.

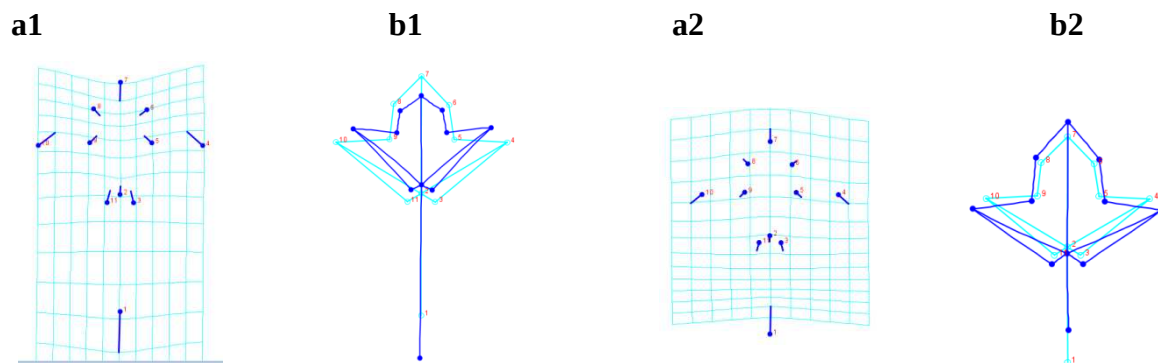


Figure 33 : Visualisation du changement de conformation de la feuille selon le premier axe.

2.4.2. Changement de conformation dans le deuxième axe

L'axe 2 (Fig.34) met en évidence un gradient entre deux types de conformations morphologiques. L'une illustrée par la figure **50a1** et **b1**, et l'autre illustrée par la figure **50a2** et **b2**

La première conformation (Fig. **50a1** et **b1**) correspond à des feuilles à :

- Base rectiligne ;
- Angle d'insertion des nervures des lobes latéraux étroit ;
- Sinus formé par le lobe apical et le lobe latéral étroit ($< 90^\circ$).



La deuxième conformation (Fig. **34a2** et **b2**) correspond à des feuilles à :

- Base cordée ;
- Angle d'insertion des nervures des lobes latéraux très larges ;
- Sinus formé par le lobe apical et le lobe latéral très large $> 90^\circ$.



Ces différences de conformations semblent correspondre à la variation entre arbres des différentes stations et pourraient être d'ordre génétique.

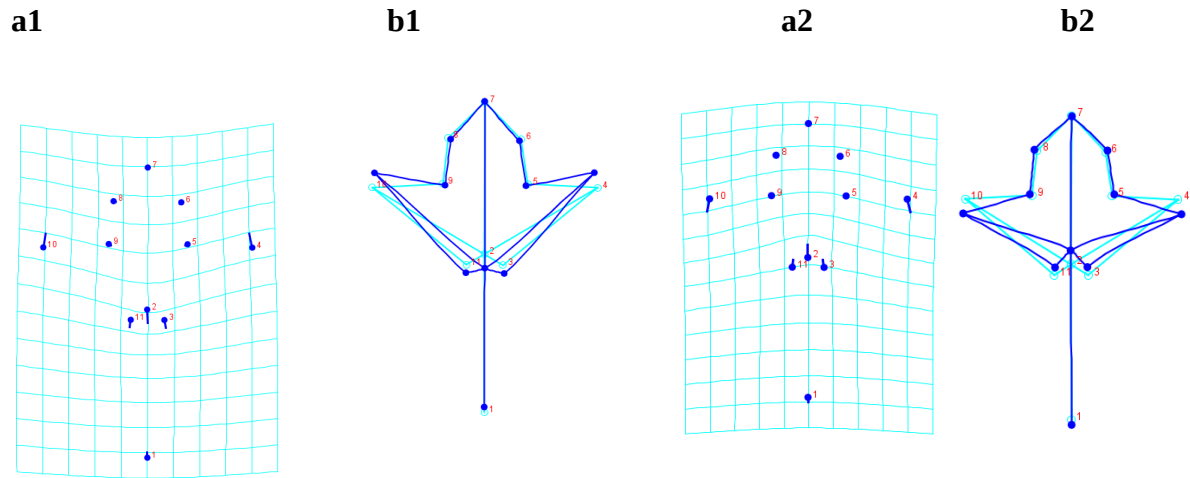


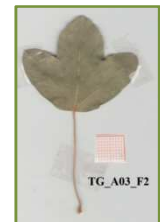
Figure 34: Visualisation du changement de conformation de la feuille selon le deuxième axe.

2.4.3. Changement de conformation dans le troisième axe

L'axe 3 met en évidence un gradient entre deux types de conformations : l'une illustrée par la figure 51 **a1** et **b1** et l'autre illustrée par la figure 51 **a2** et **b2**.

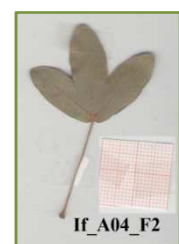
La première conformation (figure 51 **a1** et **b1**) correspond à des feuilles à :

- Lobe apical à base très large et pointe obtuse ;
- Sinus entre le lobe apical et le lobe latéral très large $> 90^\circ$;
- Lobes latéraux courts et larges ;
- Ecart entre les deux points de longueur maximale du limbe très large



La deuxième conformation (figure 51 **a2** et **b2**.) correspond à des feuilles à :

- Lobe apical à base étroite et pointe aigüe ;
- Sinus entre le lobe apical et le lobe latéral étroit ;
- Lobes latéraux longs et étroits ;
- Base du limbe courte.



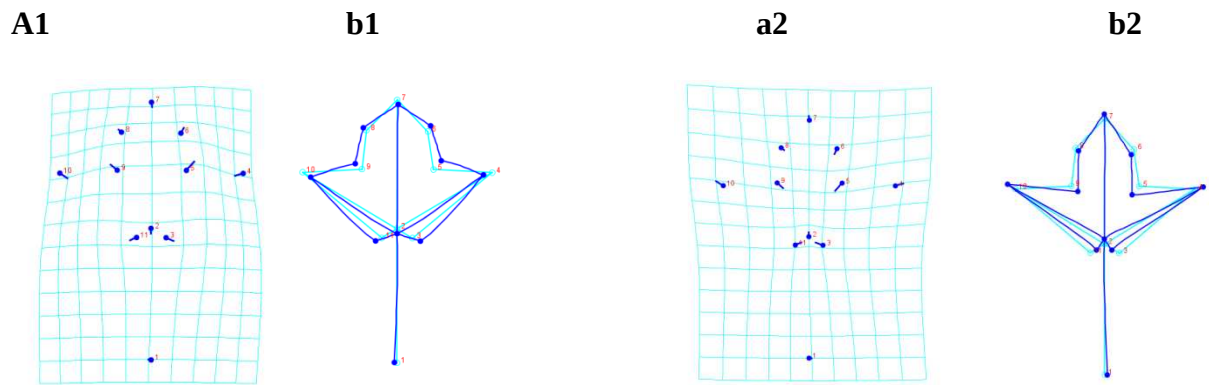


Figure 35 : Visualisation du changement de conformation de la feuille selon le troisième axe.

3. Résultat des mesures de la morphométrie moderne pour *Acer obtusatum*

3.1. Vérification des données

3.1.1. Approximation de l'espace tangent avec TpsSmall pour *A. obtusatum*

L'approximation de l'espace tangent a été testée avec tpsSmall. La pente de régression des distances euclidiennes dans l'espace tangent sur les distances de conformation de Procruste dans l'espace de conformation incurvé de Procruste est de 0.996 avec une corrélation avoisinant 1 (0.999). La moyenne des distances de conformation de Procruste est de 0.128 et le maximum est de 0.297. Ces résultats nous montre que l'approximation est excellente, nous sommes donc en mesure d'appliquer les autres analyses.

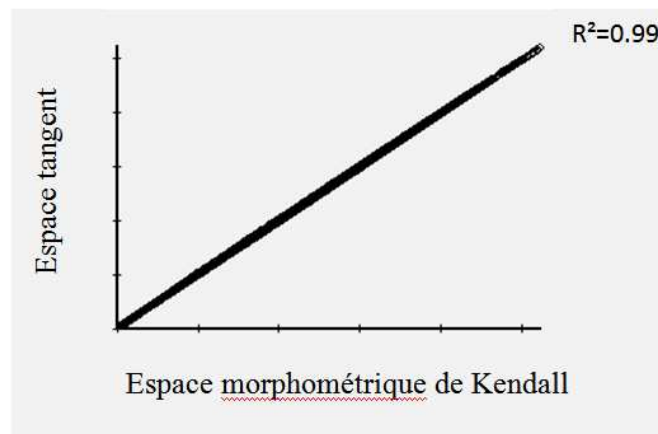


Figure 36 : Courbe de régression entre l'espace de Kendall et l'espace tangent.

3.1.2. Vérification des valeurs aberrantes pour *A. obtusatum*

Les données (en rouge) ne sont pas éloignées de la distribution normale (en bleu), nous pouvons alors conclure qu'il y a absence de valeurs aberrantes et que les données suivent une distribution normale.

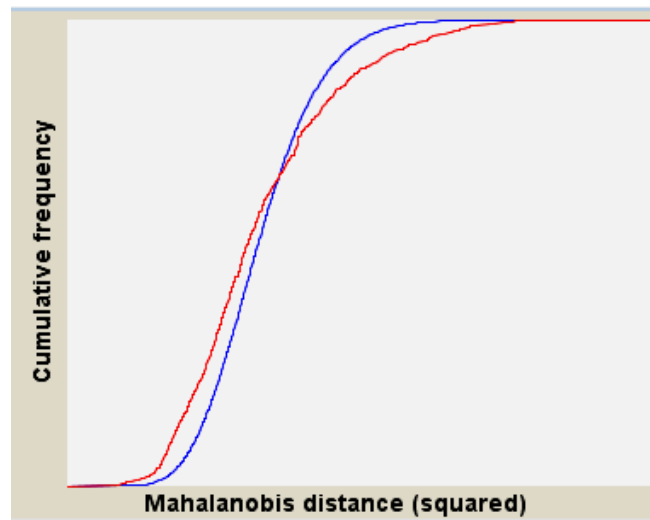


Figure 37: Diagramme de distribution cumulative des distances des échantillons individuels et de la forme moyenne de l'échantillon complet.

3.2. Résultats des superpositions de Procruste pour *A. obtusatum*

La superposition de Procruste dans MorphoJ, nous donne le graphe illustré par la figure 38. Les points repères consensus montrés en bleu sur la figure, sont entourés chacun d'un nuage de points représentant les différentes coordonnées de tous les spécimens. Les points avec un nuage compact et sombre nous renseignent que les points ont des coordonnées rapprochées alors que le nuage étalé et diffus nous indique que les coordonnées s'éloignent du consensus.

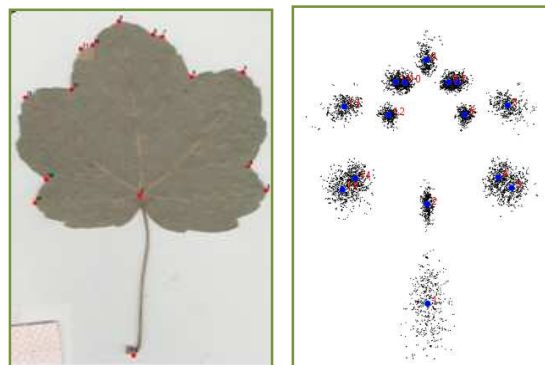


Figure 38: Résultat obtenu après superpositions de Procruste

3.3. Résultats de l'ANOVA pour *A. obtusatum*

Pour analyser et quantifier la variation de la morphologie des feuilles entre populations géographiquement distantes et connaître la quantité de variation inter- et intra-arbre et si cela était expliqué par une erreur de mesure, nous avons utilisé une analyse hiérarchique de la variance (ANOVA). Les résultats obtenus sont donnés dans les tableaux suivants.

Tableau 11: Résultat de l'analyse hiérarchique de la variance pour la taille du centroïde pour *A. obtusatum*

	%	SS	MS	df	F	P
Station	3.26%	592.262	296.131	2	1.12	0.33
Arbre	42.08%	7636.11	263.31	29	7.41	<0.0001
Feuille	54.64%	9915.183	35.538	279	1854.64	<0.0001
Erreur (Répétition)	0.003%	0.596	0.0019	311		
Total	100.00%	18144.15				

SS: Sum of Squares (Somme des carrés); MS: Mean of Sum Squares (carré moyen); df: degree of freedom (ddl).

Pour la taille (Tableau 11), le facteur « Station » est statistiquement non significatif ($p\text{-value} > 0.05$) et explique environ 3% du total de la somme des carrés. Ceci nous renseigne que le facteur station n'influe pas sur la taille des feuilles. Le facteur « arbre » est statistiquement très significatif et explique 42% de la variation de la taille des feuilles mais reste inférieur à la variation des feuilles au sein d'un même arbre qui est de 54%. L'erreur de mesure représente une valeur très négligeable (<0.003% du total de la somme des carrés).

Tableau 12 : Résultat de l'analyse hiérarchique de la variance pour la conformation pour *A. obtusatum*

	%	SS	MS	df	F	P
Station	2.26	0.238	0.0045	52	1.10	0.23
Arbre	29.40	3.089	0.0040	754	4.16	<0.0001
Feuille	68.00	7.144	0.0009	7254	232.12	<0.0001
Erreur (Répétition)	0.32	0.034	0.000004	8086	/	/
Total	100.00	10.505				

SS: Sum of Squares (Somme des carrés); MS: Mean of Sum Squares (carré moyen); df: degree of freedom (ddl).

Les résultats de l'ANOVA pour la conformation (Tableau 12) reflètent largement ceux de la taille. La variation de conformation due au facteur « Station » est statistiquement non significative ($p\text{-value} > 0.05$) et très petite expliquant seulement 2% du total de la somme des carrés.

La variation de la conformation due au facteur « Arbre » est élevée (29.4%) et très hautement significative ($p\text{-value} < 0.0001$) mais reste inférieure aux variations des feuilles au sein d'un même arbre (68.0%). L'erreur de mesure reste toutefois négligeable avec 0.32 % du total de la somme des carrés.

La faible erreur de mesure est confirmée par la figure 35 qui montre la variation de conformation de toutes les observations et de leurs répliques sur les quatre premières

composantes principales qui expliquent plus de 80% de la variance cumulée. Un grand chevauchement est observé entre les échantillons et leurs répétitions.

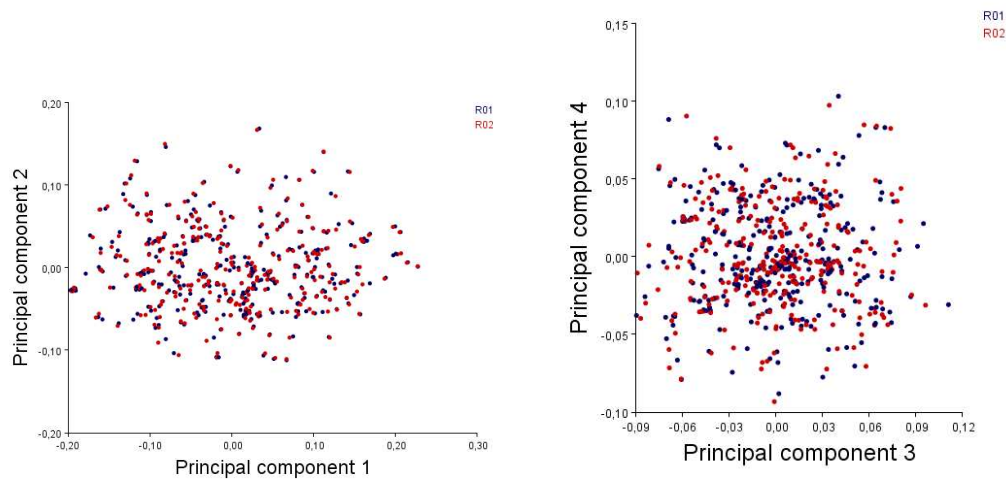


Figure 39: Variation de la conformation de toutes les observations et leurs répliques.

3.4.Résultats de l'Analyse en Composantes Principales

Les résultats de l'ANOVA ont indiqué que le facteur « Arbre » explique près de 30% de la variation morphologique des feuilles. Cette valeur est assez importante. De ce fait, nous avons mis en commun les feuilles d'un même arbre pour faire ressortir une moyenne puis nous avons appliqué une analyse en composantes principales pour mettre en évidence les arbres et la conformation des feuilles.

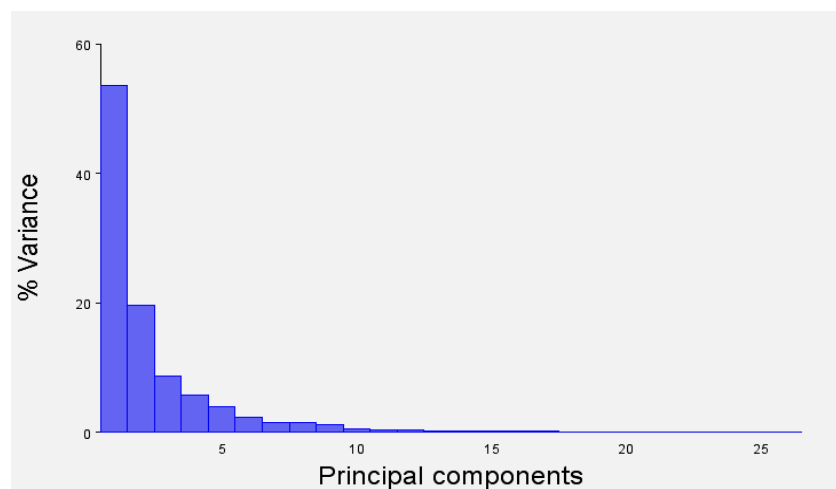


Figure 40 : Pourcentage de variation des axes en composantes principales.

Le premier axe de l'ACP explique, à lui seul, environ 53% de la variation totale. Les trois premiers axes cumulés expliquent plus de 81% de la variation totale. C'est pourquoi, seuls ces derniers sont pris en compte.

La figure 41 met en relief la distribution des arbres selon la première et la deuxième composante principale. Nous remarquons que ces derniers sont mélangés sans tenir compte de leur station respective. Les cinq individus échantillonnés à Taouilet (TA) sont distribués le long de l'axe 1 et sont noyés parmi les 23 individus d'Ighzar Ikheradhen (TT) nous indiquant que malgré leur effectif réduit, ils présentent une variabilité de conformation similaire à la variabilité chez les individus de Tala Guilef. Nous notons également que l'axe 2 oppose deux individus échantillonnés au niveau du Chemin Royal (CR). En effet, l'individu CR_A01 s'isole des autres individus alors que CR_A02 est mélangé aux autres arbres de Ighzar Ikheradhen montrant que ces deux arbres ont une conformation différente malgré leur proximité spatiale. Enfin, les 23 individus de Ighzar Ikheradhen semblent se disperser le long des deux axes.

A partir de ce graphe (**Fig.42**), nous remarquons que la majorité des arbres se concentrent au centre, néanmoins quelques uns s'isolent du groupe, notamment les arbres TT_A12 ; TT_A27 et TA_A10 qui s'opposent à TT_A09 et TT_A08 le long de l'axe 1, et les arbres CR_A01, TT_A11 et TT_A10 qui s'isolent du reste d'individus le long de l'axe 2. Les différences de conformation des feuilles sont illustrées dans la Fig.43 et Fig.44.

L'axe 3 montre une distribution des arbres sans tenir compte de la station. Les deux individus du Chemin Royal (CR) sont cette fois-ci plus proche et sont inclus dans ceux de Ighzar Ikheradhen (TT). Cependant, nous remarquons que cet axe sépare les arbres de conformations proches décrits selon les deux premières composantes principales ; les arbres TT_A27 et TA_10 se séparent de TT_A12. Nous notons également que l'arbre CR_A01 s'oppose à TT_A11 montrant que leurs conformations change suivant cet axe.

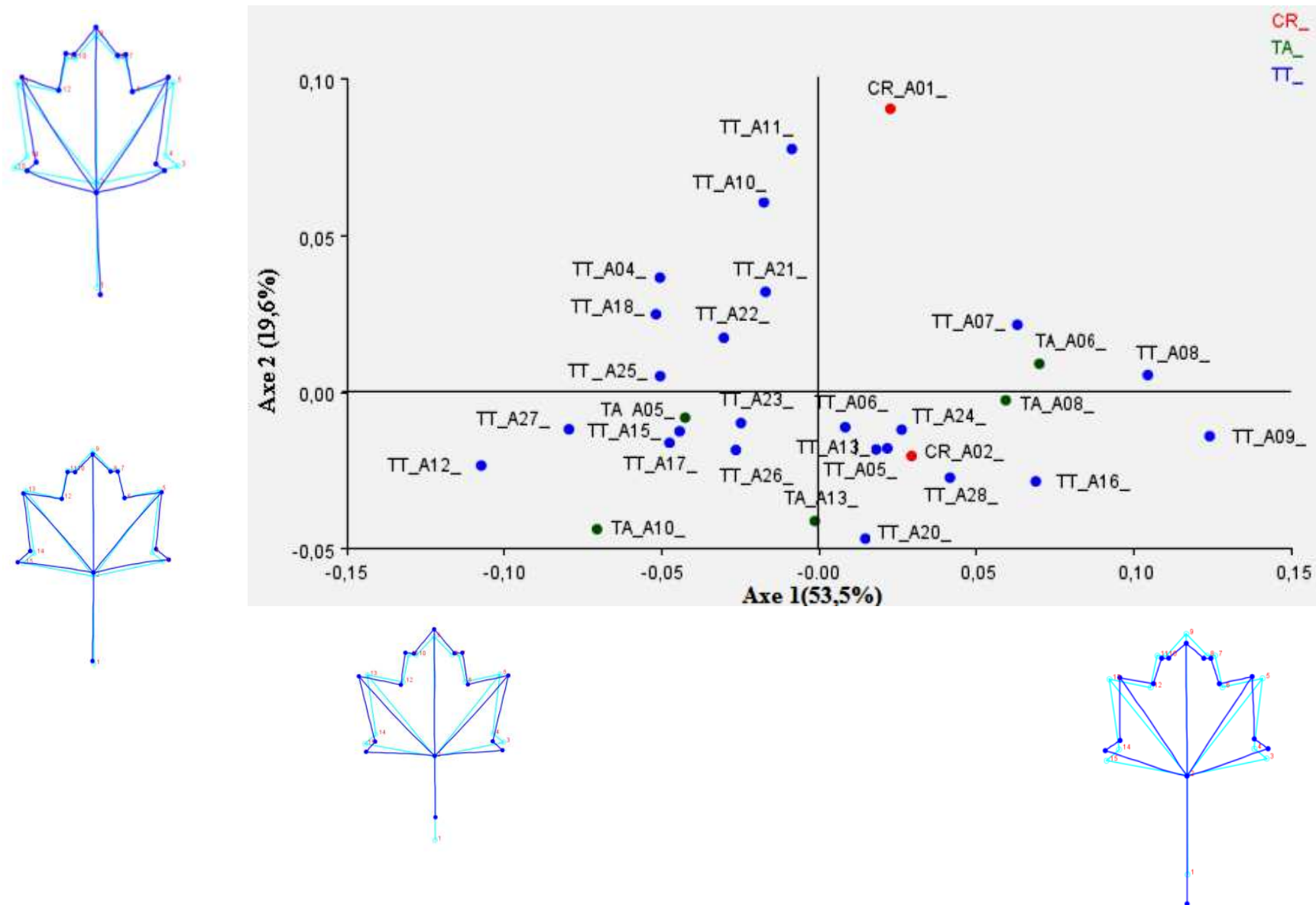


Figure 41 : Projection des individus d'*Acer obtusatum* selon les deux premières composantes principales.

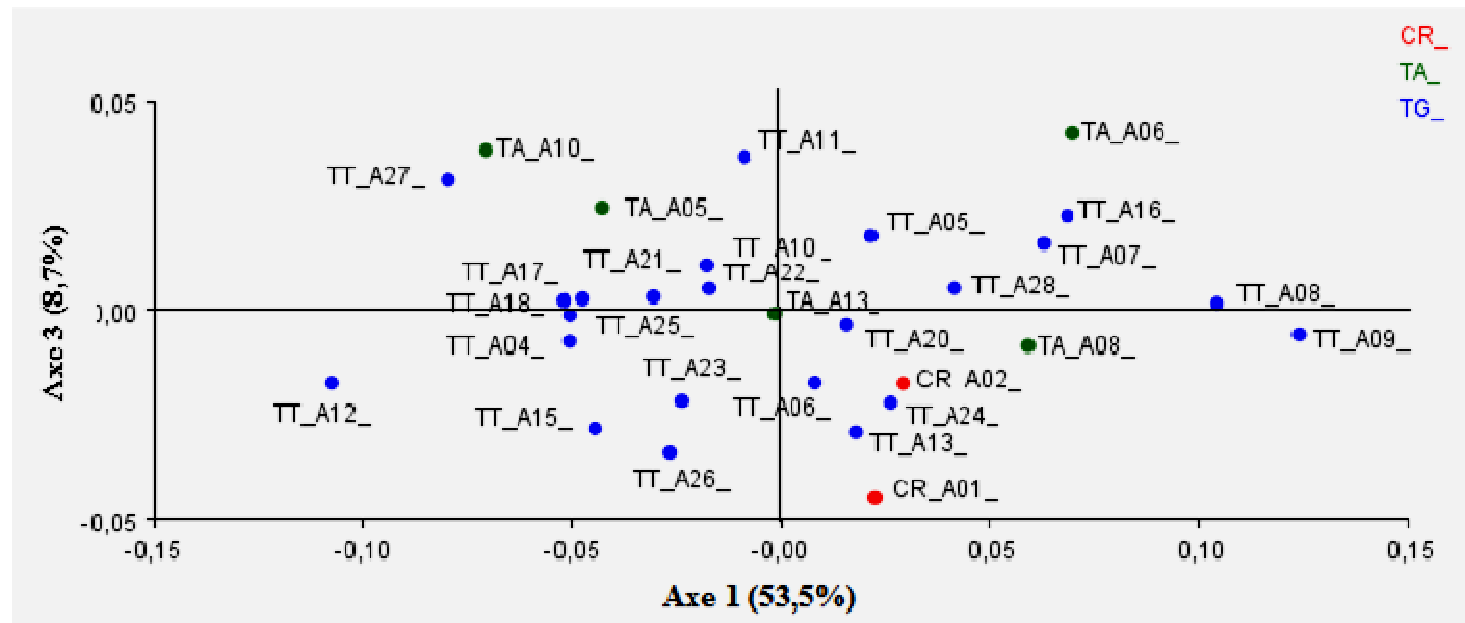
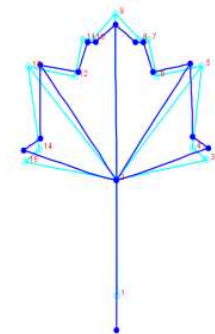
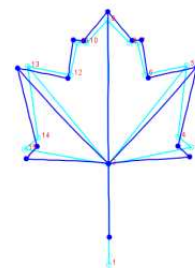
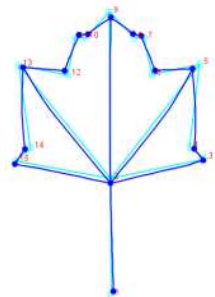
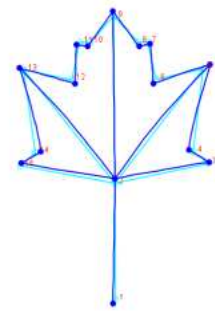


Figure 42 : Projection des individus d'*Acer obtusatum* selon la première et la troisième composante principale.

3.4.1. Changement de conformation dans le premier axe

L'axe 1 (**Fig.43**) met en évidence un gradient entre deux types de conformations, celles-ci sont donnée par deux mode de visualisation : **a.** « transformation grid » ; **b.** « wireframe graphe ».

A partir du graphe (**1a** et **b1**) ressortent des conformations représentant des feuilles à :

- Long pétiole ;
- Angle formé par les nervures des lobes inférieurs plus étroit $< 180^\circ$;
- Angle formé par les nervures des lobes supérieurs plus étroit $< 90^\circ$;
- Distance entre les extrémités des lobes inférieurs plus grande que la distance entre les extrémités des lobes supérieurs ;
- La plus grande dent du lobe apical est effacée et plus proche de l'apex ;
- Lobe apical plus court.



Les graphes **2a** et **2b** mettent en évidence des conformations représentant des feuilles à :

- Pétiole court ;
- Angle des nervures des lobes inférieurs très large $\approx 180^\circ$;
- Angle des nervures des lobes supérieurs large $\geq 90^\circ$;
- Distance entre les lobes supérieurs aussi large que la distance entre les lobes inférieurs ;
- La plus grande dent du lobe apical plus proéminente et plus éloignée de l'apex ;
- Lobe apical plus long et plus pointu.

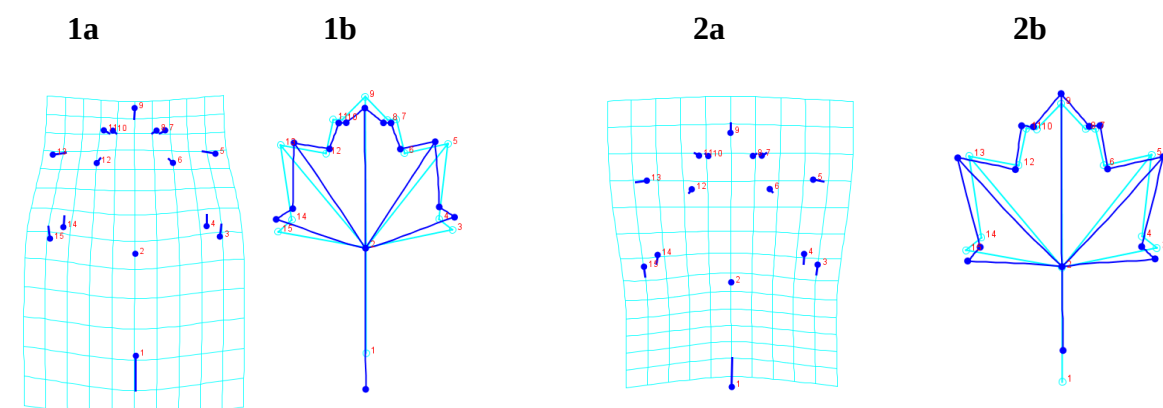


Figure 43 : Visualisation du changement de conformation de la feuille d'*Acer obtusatum* selon le premier axe.

1.4.2. Changement de conformation dans le deuxième axe

L'axe 2 met en évidence un gradient entre deux types de conformations. A partir de la figure 44 (**1a** et **1b**) ressortent des conformations représentant des feuilles à :

- Limbe plus long que large
- Distance entre les sinus des lobes inférieurs et l'extrémité de ces lobes plus courte ;
- Distances entre les extrémités des lobes inférieurs courtes ;
- Lobe latéraux petits.



Les graphes (**2a** et **2b**) mettent en évidence une conformation des feuilles à :

- limbe aussi large que long ;
- Distance entre les sinus des lobes inférieurs et l'extrémité de ces lobes plus longue ;
- Lobes latéraux plus larges ;
- Distance entre les extrémités des lobes inférieurs plus grande ;
- Distance entre les extrémités des lobes supérieurs plus large.

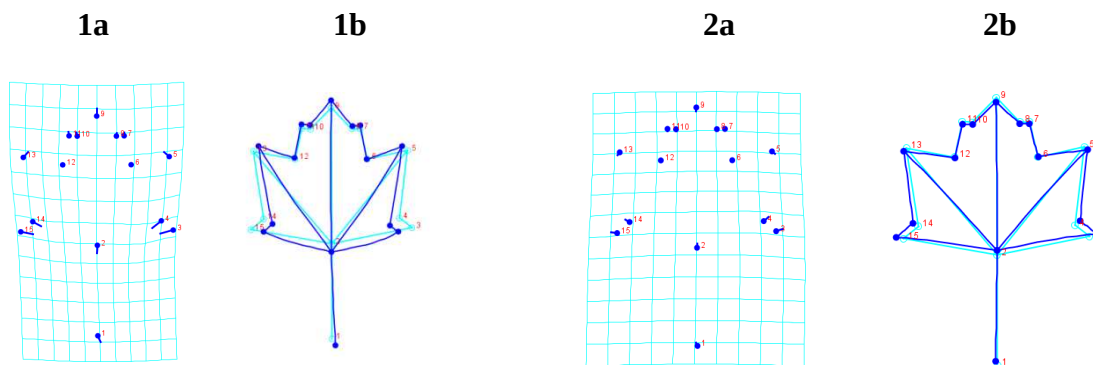
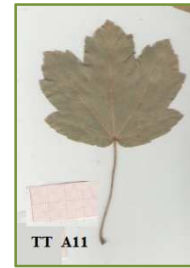


Figure 44 : Visualisation du changement de conformation de la feuille d'*Acer obtusatum* selon le deuxième axe.

1.4.3. Changement de conformation dans le troisième axe

L'axe 3 (**Fig. 45**) met en évidence un gradient entre deux types de conformations. A partir des graphes (**1a** et **1b**) ressort une conformation représentant des feuilles à :

- Base des sinus des lobes inférieurs plus éloignée de l'extrémité de ces lobes ;
- Angle d'insertion du lobe apical droit ;
- Apex plus pointu et plus long;
- Sinus du lobe apical étroit.



Les graphes (2a et 2b) mettent en évidence une conformation des feuilles à :

- Base des sinus des lobes inférieurs plus proche de l'extrémité de ces lobes ;
- Angle d'insertion du lobe apical large ;
- Apex obtus et plus court ;
- Base du lobe apical plus large.

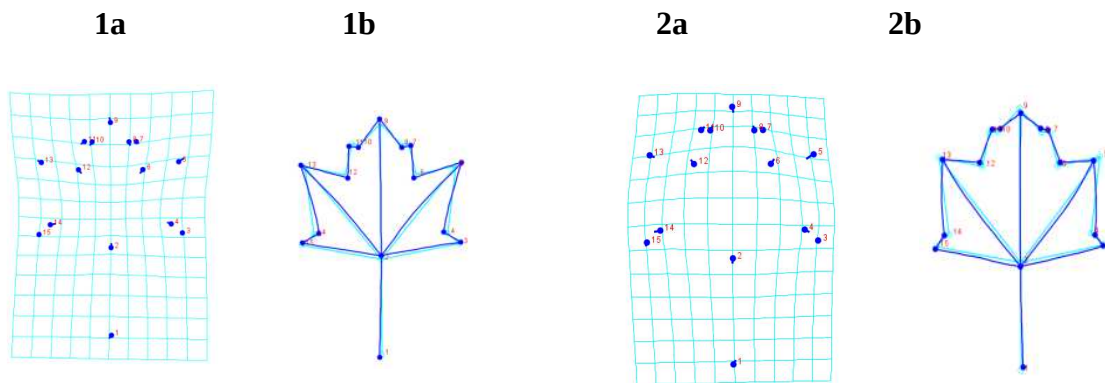


Figure 45 : Visualisation du changement de conformation de la feuille d'*Acer obtusatum* selon le troisième axe.

4. Discussion

L'objectif de ce mémoire était d'analyser la variabilité morphologique interindividuelle et interstationnelle de la morphologie des feuilles de deux espèces d'Erables au Djurdjura (*Acer monspessulanum* et *A. obtusatum*) par deux méthodes morphométriques : la morphométrie classique et la morphométrie moderne par l'approche des points repères.

L'échantillonnage s'est effectué pendant l'automne 2014 et sur plusieurs sorties sur terrain. *Acer monspessulanum* a été échantillonné au niveau de deux stations représentant les deux extrémités des cédraies du Djurdjura (Azrou N'Thor et Tala-Guilef). 15 arbres par station ont été échantillonnés.

Les mesures classiques ont été faites sur 3 paires de feuilles par rameau de l'année selon trois niveau d'insertion (F1 : feuilles basales ; F2 : feuilles médianes et F3 : feuilles terminales), sur 2 rameaux par orientation et 4 orientations par arbre. Sur chaque feuille 11 paramètres ont été mesurés. Ce qui fait un total de 15840 mesures (2 stations x 15 arbres x 4 orientations x 2 rameaux x 3 niveaux d'insertion des rameaux x 2 feuilles par niveau).

Pour l'étude par la méthode des points repères, nous avons choisi 10 à 15 feuilles à marge intacte par arbre sur l'ensemble des arbres échantillonnés soit un total de 346 feuilles sur lesquelles nous avons digitalisé 11 points repères soit un total de 3806 points digitalisés.

A. obtusatum a été échantillonné dans une cédraie du versant Nord (Tala Guilef) à deux altitudes différentes. Selon la disponibilité du matériel végétal, 23 arbres ont été échantillonnés au lieu-dit « Ighzer Ikharadhen » à 1450 m d'altitude et deux arbres au niveau du « Chemin Royal » à 1585 m d'altitude, 05 autres arbres ont été échantillonnés dans la station de Taouialt dans la cédraie du Sud du Djurdjura (Tikjda).

Les mesures classiques ont été faites sur 20 feuilles par arbre soit un total de 600 feuilles sur lesquelles 15 paramètres ont été mesurés et plusieurs ratios calculés (ces derniers ne sont pas exposés dans cette étude faute de temps pour leur interprétation).

Pour l'étude morphologique par la méthode des points repères, nous avons échantillonnés 08 à 15 feuilles par arbre sur l'ensemble des arbres échantillonnés soit un total de 336 feuilles sur lesquels nous avons digitalisé 15 points repères. Il est à rappeler que nous avons répété l'opération de digitalisation deux fois pour extraire l'erreur due à la mesure. Ce qui fait un total de 10080 points digitalisés.

Grace aux nombreuses sorties sur terrain que nous avons effectuées dans les stations étudiées nous avons remarqué qu'effectivement comme l'a mentionné Rameau *et al.*, (2008), *A. monspessulanum* se présente comme une espèce héliophile ou de demi-ombre. Elle est absente dans le sous-bois à part quelques petits pieds rabougris retrouvés en sous-bois de cèdre au niveau du lit de l'oued à Ighzar Ikharadhen (Tala Guilef) et à Tigounatine (Tikjda). Cette essence préfère les zones ouvertes et de clairière où sa croissance est optimale. Nous avons observé des individus atteignant 12 m de hauteur et plus de 60 cm de diamètre à Djamaa Adharchi (Tala Guilef). A l'opposé *A. obtusatum*, présenté par Rameau *et al.*, (2008) comme une espèce héliophile tolérant peu d'ombrage n'est retrouvée qu'en sous-bois dans le cas présent.

4.1. Variation morphologique des feuilles

4.1.1. Variabilité intra-arbre

L'analyse de la variabilité morphologique des feuilles de *A. monspessulanum* selon le facteur exposition a montré que ce dernier n'est pas significatif. Ce résultats était prévisible car les deux stations échantillonnées (Tala Guilef et Azrou n'Thor) sont ouvertes et les arbres bien ensoleillés par tous les côtés.

Les résultats obtenus par la méthode classique ont montré une variabilité morphologique selon le paramètre «niveau d'insertion des feuilles sur le rameau ». En effet, la morphologie des feuilles change le long du rameau, les feuilles basales (F1) sont plus grandes, ont un pétiole plus long que le limbe et une plus grande surface foliaire que les feuilles terminales (F3) alors que les feuilles médianes (F2) présentent des valeurs intermédiaires.

La méthode des points repères a mis en évidence les mêmes tendances, l'analyse de la variance des distances de Procrustes a montré que la variation de la morphologie des feuilles due au facteur « insertion des feuilles au niveau du rameau » était de 53% pour la taille et de 44.47 % pour la conformation ce qui signifie que ce paramètre explique la plus grande part de variation morphologique des feuilles.

Les feuilles basales (F1) présentent la conformation caractérisée par : un long pétiole ; un limbe étroit ; un angle formé par les nervures des lobes latéraux étroit ; un lobe apical court et étroit occupant 1/3 du limbe. A l'opposé, les feuilles terminales présentent une conformation caractérisée par : un pétiole très court ; un limbe grand et large ; un angle formé par les nervures des lobes latéraux très grand ($>90^\circ$) ; un lobe apical plus long et plus large occupant 1/2 du limbe.

Les résultats ci-dessus indiquent des tendances similaires pour les deux méthodes utilisées. Elles ont mis en évidence le rôle de l'ontogénie des feuilles au niveau du rameau de *Acer monspessulanum*. Ceci concorde avec les résultats de Critchfield (1971) sur *Acer pensylvanicum*. Ce phénomène d'ontogénie au niveau du rameau a été également observé chez le genre *Populus* (Critchfield, 1960). Il est expliqué par le fait que chez ces plantes ligneuses, l'allongement des pousses stoppe au moins temporairement après l'expansion du bourgeon hivernal, et marque un temps de repos puis reprend la croissance après l'expansion du bourgeon estival (Spath 1912, in Critchfield, 1971 ; Critchfield, 1960).

Chez *A. obtusatum*, les résultats de l'ANOVA des distances de Procrustes donnent un très petit taux de variation morphologique dû à l'erreur de mesure lors de la digitalisation des points repères. En effet, il est de 0.003% pour la taille et 0.32% pour la conformation, ce qui nous indique que les points repères choisis sont bien définis et peuvent être localisés avec précision sur les images scannées. La planéité des feuilles de nombreuses espèces et l'utilisation des points repères bien définis au niveau des points de veines et d'autres structures clairement définies en font un matériau particulièrement adapté pour les analyses en morphométrie géométrique à 2 dimensions (Viscosi et Cardini, 2011).

Chez *Acer obtusatum*, parmi les facteurs pris en compte dans l'analyse de la variation de la taille et de la conformation de la feuille (station, arbre, et feuille dans l'arbre), c'est la « feuille » qui a expliqué la plus grande part de variation de la taille (*i.e.* 54.64%) et de la conformation (*i.e.* 68%). Dans le cas de *Acer monspessulanum* en ayant tenu compte du niveau d'insertion des feuilles sur le rameau, la part de variation expliquée respectivement par la feuille n'est que de 4.35% pour la taille et de 10% pour la conformation et celle expliquée

par le niveau d'insertion est de 53.06% et 44.47% pour respectivement la taille et la conformation. Par analogie, nous pouvons considérer que dans la part élevée de variation expliquée par la feuille chez *Acer obtusatum* pourrait se trouver une fraction notable due au niveau d'insertion des feuilles donc à leur ontogénie. Critchfield (1971) rapporte les mêmes tendances morphologiques chez le genre *Acer*, mais l'ontogénie au niveau du rameau varie considérablement entre espèces. Elle est plus au moins exprimée selon les espèces et les sections auxquelles elles appartiennent. Selon cet auteur, cette hétérophylle chez *Acer* n'a pas causé de grandes difficultés taxonomiques vu que la grande majorité des spécimens d'herbier sont des rameaux floraux ou fructifères associés seulement avec des feuilles précoces (donc basales), le feuillage des axes végétatifs allongés est sous-représenté ou absent. Cet auteur précise que ce critère d'hétérophylle pourrait être d'une valeur intrinsèque considérable dans la classification des espèces à l'intérieur des sections.

4.1.2. Variabilité inter arbres

Afin de caractériser la morphologie des feuilles d'*Acer monspessulanum*, nous nous sommes basés uniquement sur les feuilles basales dont la croissance est jugée plus accomplie. Ces feuilles ont montré une forte variabilité entre arbres. Ainsi, nous avons noté un intervalle par arbre de 1.25 à 2.03 pour le ratio « longueur de la feuille sur sa largeur » (RLL) ; de 0.57 à 1.05 pour le ratio « longueur du limbe sur longueur du pétiole » (RLP :) ; de 0.59 à 1.30 pour le ratio « longueur du lobe apical sur sa largeur » (RLA) ; et 45° à 69° pour l'angle d'insertion de la nervure du lobe latéral par rapport à la nervure principale (AngLob). Nous avons noté que la base du limbe peut être cordée ou tronquée, ce qui concorde avec la description de Pignatti (1982) pour ce taxon. Cependant, selon cet auteur la longueur du lobe apical représente 1/2 du limbe alors que selon nos résultats elle représente 1/3 à 2/3 de la longueur du limbe (avec un ratio allant de 0.36 à 0.66).

La méthode moderne a également montré les mêmes tendances, l'ANOVA des distances de Procrustes a montré une variation de 30.48% de la variance pour la taille de la feuille et 22.29% pour sa conformation. En effet, les résultats que l'effet « arbre » a expliqué montrent l'existence de deux morphotypes pour les feuilles de l'Erable de Montpellier avec d'un côté, des arbres à feuilles ayant une base tronquée ; un angle d'insertion des nervures des lobes latéraux étroit et un sinus formé par le lobe apical et le lobe latéral étroit (<90°) et d'un autre côté, des arbres à feuilles ayant une base cordée ; un angle d'insertion des nervures des lobes latéraux très large et un sinus formé par le lobe apical et le lobe latéral très large.

Notons que les individus présentant ces deux morphotypes comme ceux ayant des caractéristiques intermédiaires ont été indifféremment observés au sein des deux stations bien qu'avec un taux de représentativité différent.

Acer obtusatum présente également une forte variabilité inter-arbres. L'angle des nervures des lobes inférieurs ; l'angle des nervures des lobes supérieurs ainsi que la forme du lobe apical sont des caractéristiques qui varient entre arbres. Ceci pourrait être dû à la présence d'hybrides de cette espèce avec les autres espèces d'Erables (*A. opalus*, *A. monspessulanum* et *A. campestre*) présentent au Djurdjura (Azira, 2001, Yahi, 2007 ;

Meddour, 2010). En effet, les espèces d'Erables possèdent un grand pouvoir d'hybridation essentiellement entre espèces appartenant à la même section (De Jong, 1976 ; Ackerly et Donoghue, 1998). De plus, les conditions extrinsèques comme le degré d'éclairement, les conditions édaphiques, la disponibilité de l'eau et des nutriments peuvent influencer sur la morphologie des feuilles (Sultan, 2003 ; Shelley et David, 2007)

4.1.3. Variabilité inter stations

Pour le facteur « station », Azrou n'Thor (If) et Tala Guilef (TG) correspondent au même étage de végétation. Néanmoins, le port des individus est meilleur à Tala Guilef par rapport à Azrou n'Thor avec respectivement des hauteurs moyennes de 5 et 7 m et des diamètres moyens de 36 et 65 cm. Cette supériorité des dimensions est peut-être liée à une meilleure préservation de la station de Tala Guilef du fait de son inclusion dans le territoire du Parc National du Djurdjura (PND) et du fait qu'il n'y a pas de villages à proximité contrairement à Azrou n'Thor qui est situé en dehors du PND et à moins de 2 km du village le plus proche. La pression anthropique est donc plus intense à Azrou n'Thor où nous avons noté plusieurs arbres taillés par les riverains qui utilisent le bois pour le chauffage et les feuilles comme fourrage.

L'analyse de la variance des distances de Procrustes suggère une variation modeste de la taille et de la conformation des feuilles selon le facteur station qui n'explique que 0.27% et 2.56% de leurs variances respectives. Ceci peut être dû à la proximité des deux stations qui ne sont distantes l'une de l'autre que de 35 km à vol d'oiseau.

Pour *A. obtusatum*, les deux stations également choisies correspondent au même étage de végétation sur des versants opposés : Tala Guilef sur le versant Nord et Taouialt sur le versant sud distantes de près de 15 km à vol d'oiseau. Les résultats de l'ANOVA des distances de Procruste n'ont pas révélé de variation significative de la taille et de la conformation des feuilles selon ces deux stations. La courte distance séparant les stations permettrait l'échange de pollen, sachant que le pollen d'*Acer* peut être transporté à des milliers de kilomètres tout en restant viable (Rousseau *et al.*, 2006).

5. Apport de la morphométrie classique et moderne

Comme nous l'avons déjà définie, la morphométrie traditionnelle consiste à mesurer les distances linéaires (longueur, largeur, angle surface, etc.) et à calculer des ratios. Ces mesures sont ensuite soumises à des tests statistiques uni ou multivariés pour l'analyse de la variation morphologique (Rohlf et Bookstein, 1990 ; Bookstein, 1996 ; Dean *et al.*, 2004). Bien que cette méthode ait offert et offre toujours un large éventail de techniques pour traiter une variété de questions scientifiques en biologie et dans d'autres domaines, elle rencontre quelques limites difficiles à surmonter. En effet, pour caractériser la conformation d'un objet, plusieurs mesures linéaires peuvent rayonner d'un même point ce qui peut rendre leurs valeurs non indépendantes et toute erreur dans la localisation d'un point affecterait l'ensemble des mesures (Zelditch *et al.*, 2012). En outre, le calcul des ratios n'est pas toujours évident

sachant qu'un même ratio peut être produit par des formes différentes (Cardini, 2013). Zelditch *et al.*, (2012) affirment également qu'il est complexe de reconstituer la conformation d'un organisme à partir des mesures linéaires. En effet, un objet décrit par 16 points repères, nécessite 120 mesures linéaires afin de reconstituer sa conformation. Ces limites ont poussé plusieurs auteurs à préconiser la méthode de morphométrie géométrique, notamment l'approche par les points repères qui, une fois les points repères homologues bien choisis, permet une visualisation instantanée de la conformation de l'objet à analyser (Cucchi *et al.*, 2015). Cette méthode a fait ses preuves dans de nombreux domaines de la biologie notamment en zoologie : chez les mammifères (Marcus *et al.*, 2000 ; Cardini et Tongiorgi, 2003), les poissons (Ponton, 2006 ; Clabault, 2007), les insectes (Aytekin *et al.*, 2007). En botanique, plusieurs taxonomistes et botanistes ont reconnu le potentiel de cette méthode dans leur domaine (Jensen, 2003) et plusieurs études de morphométrie géométrique ont été menées notamment pour résoudre des problèmes taxonomiques (Marini et Scoppola, 2010) et la détermination des espèces et leurs hybrides (Jensen *et al.*, 2002 ; Viscosi *et al.*, 2009, 2010).

Conclusion

Au terme de ce travail, nous avons abouti aux résultats discutés ci-dessus. Chez *Acer monspessulanum*, la méthode classique comme la méthode des points repère ont abouti à une caractérisation concordante des feuilles. Parmi les facteurs pris en compte, le niveau d'insertion des feuilles sur les rameaux explique une part importante de la variation de la feuille suivi de l'effet arbre alors que l'effet station est négligeable.

En effet, la méthode moderne a révélé chez ce taxon l'existence de 2 types de conformations de la feuille selon leur insertion le long du rameau. Les feuilles basales ont une conformation caractérisée par un long pétiole ; associé à un limbe étroit ; à un angle formé par les nervures des lobes latéraux étroit ; et à un lobe apical court et étroit occupant 1/3 du limbe. Alors que les feuilles terminales ont une conformation caractérisée par un pétiole très court, associé à un limbe grand et large ; à un angle formé par les nervures des lobes latéraux très grand ($>90^\circ$) et à un lobe apical plus long et plus large occupant 1/2 du limbe.

Elle a aussi révélé l'existence de deux morphotypes selon les arbres avec d'un côté, des arbres dont les feuilles ont une base tronquée ; un angle d'insertion des nervures des lobes latéraux étroit et un sinus formé par le lobe apical et le lobe latéral étroit ($<90^\circ$) et d'un autre côté, des arbres dont les feuilles ont une base cordée ; un angle d'insertion des nervures des lobes latéraux très large et un sinus formé par le lobe apical et le lobe latéral très large.

Chez *A. obtusatum*, la méthode moderne a révélé aussi une forte variabilité inter-arbres. En effet, l'angle des nervures des lobes inférieurs ; l'angle des nervures des lobes supérieurs ainsi que la forme du lobe apical se sont révélés variables entre les arbres.

Cette étude nous a permis d'utiliser de nombreux logiciels et de nous familiariser avec une méthode morphométrique de plus en plus utilisée. La méthode de morphométrie - géométrique appliquée à nos échantillons s'est révélée utile et discriminante. Cette méthode est fastidieuse dans son étape d'initiation car elle nécessite une préparation des échantillons (feuilles séchées, pressées, scannées) et un choix minutieux des points repères (PR) établis pour reconstituer au mieux la conformation de la feuille. Cependant, une fois ces étapes réalisées, et la digitalisation effectuée, les résultats sont assez satisfaisants et permettent de constituer une base de données numérisée où les feuilles peuvent être réutilisées plusieurs fois.

Nous sommes satisfaits du choix que nous avons entrepris pour les points repères digitalisés. Cependant, les PR 3, 6, 8 et 11 choisis pour l'espèce *A. monspessulanum* sont assez difficiles à trouver car représentant une courbe, c'est pour cela que nous pensons qu'il serait plus adéquat d'analyser ces emplacements avec des points glissants (sliding semi-landmarks). Il serait plus judicieux également d'ajouter des points repères au niveau de la base du limbe ainsi qu'au niveau de la dent la plus proéminente des lobes latéraux pour mieux cerner la conformation des feuilles de *A. obtusatum*. En outre, nous conseillons d'effectuer l'échantillonnage juste à la fin de l'été ou bien au tout début de l'automne pour éviter d'avoir des feuilles dont la marge est endommagée.

Plus globalement, ce présent travail suggère des compléments d'investigations qui nous paraissent importants :

- Etendre l'échantillonnage sur d'autres zones du Djurdjura et d'Algérie et inclure les autres espèces d'Erables existantes ;
- Caractériser la morphologie des samares pour les différentes espèces d'Erables ;
- Etudier la variabilité morphologique des feuilles poussant sur des rameaux d'âge différents et sur un niveau du houppier différent ;

- Etudier la variabilité morphologique des feuilles entre les rameaux axillaires courts et les longs rameaux principaux.

Références bibliographiques

Adesmed Kh., 1981: Le Cèdres de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) dans les massifs de l'Aurès et du Bélezma. Etude phytosociologique, problèmes de conservation et d'aménagement. Thèse Doc. Ing., Univ. Aix-Marseille III, 199 p.

Ackerly D.D., Donoghue M.J. 1998: Leaf size, sapling allometry, and Corner's rules. Phylogeny and correlated evolution in maples (*Acer*). *American Naturalist* 152: 767–791.

Adams, D. C., Rohlf, F. J., and Slice, D. E. 2004: Geometric morphometrics: ten years of progress following the 'revolution'. *Italian Journal of Zoology*, 71(1), 5-16.

Adams, D. C., Rohlf, F. J., and Slice, D. E. 2013: A field comes of age: geometric morphometrics in the 21st century. *Hystrix, the Italian journal of Mammalogy*, 24(1), 7-14.

Aytekin, M. A., Terzo, M., Rasmont, P., and Çağatay, N., 2007: Landmark based geometric morphometric analysis of wing shape in *Sibiricobombus* Vogt (Hymenoptera: Apidae: *Bombus* Latreille). In *Annales de la Société Entomologique de France* (Vol. 43, No. 1, pp. 95-102). Taylor and Francis Group.

Azira F., 2001: Contribution à l'étude phytosociologique des groupements à érables de la région centre d'Algérie. Thèse de magister, FSB, Univ. Sc. Et Tech. Houari Boumédiène, 216p.

Barour, C., 2012 : Analyse de la Biodiversité des Populations d'Abeilles Mellifères *Apis mellifera* intermissa (Buttel-Reepen, 1906) (Hymenoptera : *Apidea*) dans le Nord Algérien : Morphométrie Moderne Basée sur la Configuration des Points-Repères (Landmarks). Badji-Mokhtar Annaba. 298 p.

Bookstein, F. L., 1996: Biometrics, biomathematics and the morphometric synthesis. *Bulletin of mathematical biology*, 58(2), 313-365.

Bookstein, F. L., 1997: Morphometric tools for landmark data: geometry and biology. Cambridge University Press. 435 p.

Cardini A., 2013: Morphometric geometrics. Article definition for Encyclopedia of Life Support Systems EOLSS: <http://www.oelss.net/>

Cardini A., and Tongiorgi, P., 2003: Yellow-bellied marmots (*Marmota flaviventris*) in the shape space (Rodentia, Sciuridae): sexual dimorphism, growth and allometry of the mandible. *Zoomorphology*, 122(1), 11-23.

Clabaut, C., Bunje, P. M. E., Salzburger, W. and Meyer, A., 2007: Geometric morphometric analyses provide evidence for the adaptive character of the tanganyikan cichlid fish radiations. *Evolution*, 61: 560–578.

Cope, J. S., Corney, D., Clark, J. Y., Remagnino, P., and Wilkin, P., 2012: Plant species identification using digital morphometrics: A review. *Expert Systems with Applications*, 39(8), 7562-7573.

Couplan F., 2012 : Les plantes et leur noms : histoires insolites. Edition Quae. 224 p.

Critchfield, W. B., 1971: Shoot growth and heterophylly in *Acer*. Journal of the Arnold Arboretum Vol. 52, N. April, 240-266.

Critchfield W. B., 1960: Leaf dimorphism in *Populus trichocarpa*. AMERICAN Journal of Botany. Vol.47 N.8. PP 699-711.

Cucchi T., Baylac M., Evin A., Bignon-Lau O. et Vigne J-D., 2015 : Morphométrie géométrique et archéozoologie : Concepts, méthodes et applications. (Chap. 4), In **Belasse Y., Geigl E-M., Oberlin C. et Reich I.**, «Messages d'os: Archéométrie du squelette animal et humain ».Ed. Archives contemporaines. 197-216.

De Jong P.C., 1976: Flowering and sex expression in *Acer* L. A biosystematic study. Mededelingen Landbouwhogeschoological Wageningen, Nederland 76:1–201.

Ducci, F., Proietti, R., Carone, G., and Apuzzo, S., 2010 : First surveys on genetic variability and structure of field maple (*Acer campestre* L.) in natural and managed populations in the landscape of central and southern Italy.*Annals of Silvicultural Research*, 36, 125-138.

Gleiser, M., and Verdù M., 2005: Repeated evolution of dioecy from androdioecy in *Acer*. New Phytol. 165:633–640.

Grimm G W., Denk T., Hemleben V., 2007: Evolutionary history and systematics of *Acer* section *Acer* – a case study of low-level phylogenetics. Pl Syst Evol 267: 215–253.

Hasebe, M., Ando, T., and Iwatsuki, K., 1998: Intrageneric relationships of maple trees based on the chloroplast DNA restriction fragment length polymorphisms. *Journal of plant research*, 111(3), 441-451.

Huang, S. F., Ricklefs, R. E., and Raven, P. H., 2002: Phylogeny and historical biogeography of *Acer* I-Study history of the infrageneric classification.*TAIWANIA: 植物科學期刊*, 47(3), 203-218.

Jensen, R. J., Ciofani, K. M., and Miramontes, L. C., 2002 : Lines, outlines, and landmarks: morphometric analyses of leaves of *Acer rubrum*, *Acer saccharinum* (Aceraceae) and their hybrid. Taxon, 475-492.

Klingenberg, C. P., 2011: MorphoJ: an integrated software package for geometric morphometrics. Molecular ecology resources, 11(2), 353-357.

Klingenberg, C. P., 2010: Evolution and development of shape: integrating quantitative approaches. Nature Reviews Genetics, 11(9), 623-635.

Klingenberg, C. P., 2002: Morphometrics and the role of the phenotype in studies of the evolution of developmental mechanisms. Gene, 287(1), 3-10.

Lapie G., Maige A., 1914 : Flore forestière de l'Algérie, Comprenant les arbres, arbustes et arbrisseaux les plus répandus en Tunisie, Maroc et midi de la France.337 p.

- Laribi M., 2000 :** Contribution à l'étude phytosociologique des formations caducifoliées à *Quercus canariensis* Willd. et *Quercus afares* Pomel du massif d'Ath Ghobri-Akfadou (Grande Kabylie).Thèse de Magistère, UMMTO, 155 p.
- Lateb M., 2014:** Contribution à l'étude des hybrides des chênes de la forêt de l'Akfadou, via l'approche « Geometric morphometrics ». Mémoire Magistère, UMMTO, 71 p.
- Li, J.,Yue, J., and S. Shoup. 2006:** Phylogenetics of Acer (Aceroidae, Sapindaceae) based on nucleotide sequences of two chloroplast non-coding regions. Harvard Pap. Bot. 11:101–115.
- Loy A., Busilacchi S., Costa C., Ferlin L., and Cataudella S., 2000:** Comparing geometric morphometrics and outline fitting methods to monitor fish shape variability of *Diplodus puntazzo* (Teleostea: Sparidae). Aquacultural Engineering, 21(4), 271-283.
- Marcus, L., Hingst-Zaher, E., and Zaher, H., 2000:** Application of landmark morphometrics to skulls representing the orders of living mammals. *Hystrix, the Italian Journal of Mammalogy*, 11(1). 27-47.
- McLellan, T., and Endler, J. A. 1998:** The relative success of some methods for measuring and describing the shape of complex objects. *Systematic Biology*, 47(2), 264-281.
- Meddour R., 2010 :** Bioclimatologie, phytogéographie et phytosociologie en Algérie: Exemple des groupements forestiers et préforestiers de la Kabylie Djurdjurienne. Thèse Doctorat ès science, UMMTO, 397 p.
- Metaire L., 2014:** Apports de la morphométrie géométrique à la paléoanthropologie dentaire Diplôme d'Etat de Docteur en Chirurgie Dentaire, Université Claude Bernard ,lyon1,UFR d'Odontologie.50 p.
- Mitteroecker, P., Gunz, P., Windhager, S., and Schaefer, K., 2013:** A brief review of shape, form, and allometry in geometric morphometrics, with applications to human facial morphology. *Hystrix, the Italian Journal of Mammalogy*, 24(1), 59-66.
- Ogata, K., 1967:** A systematic study of the genus *Acer*. Bull, of the Tokyo Univ. Forests No. 63:89-203.
- Perrard, A., 2012 :** Systématique et morphométrie géométrique: l'évolution de la nervation alaire au sein du genre *Vespa* (Hyménoptères, Vespides) (Doctoral dissertation, Paris, Muséum national d'histoire naturelle).210 p.
- Pignatti S., 1982 :** Flora d'Italia. Edagricole, Bologna, vol. 2, 1982. 67-70.
- Polly, P. D., Lawing, A. M., Fabre, A. C., and Goswami, A., 2013:** Phylogenetic principal components analysis and geometric morphometrics. *Hystrix, the Italian Journal of Mammalogy*, 24(1), 33-41.
- Quezel, P., et Médail, F., 2003:**Écologie et biogéographie des forêts du bassin méditerranéen, Paris, Elsevier, 2003, 572 p.

- Quezel, P., et Santa, S., 1963 :** Nouvelle flore d'Algérie et des régions désertiques méridionales. C.N.R.S., Paris. 1170 p.
- Rameau, J.C., Mansion, D., et Dumé, G., 2008 :** Flore forestière française: région méditerranéenne (Vol. 3). Forêt privée française.2432 p.
- Renner, S. S., Beenken, L., Grimm, G. W., Kocyan, A., and Ricklefs, R. E., 2007:** The evolution of dioecy, heterodichogamy, and labile sex expression in *Acer*. *Evolution*, 61(11), 2701-2719.
- Richtsmeier, J. T., Lele, S. R., and Cole III, T. M., 2005:** Landmark morphometrics and the analysis of variation. *Variation: A central concept in biology*, 49-69.
- Richtsmeier, J. T., Burke Deleon, V., and Lele, S. R. 2002:** The promise of geometric morphometrics. *American journal of physical anthropology*, 119(S35), 63-91.
- Rohlf, F.J., 2003:** Bias and error in estimates of mean shape in geometric morphometrics. *Journal of Human Evolution*, 44(6), pp.665–683.
- Rohlf, F. J., 2000:** On the use of shape spaces to compare morphometric methods. *Hystrix, the Italian Journal of Mammalogy*, 11(1).
- Rohlf, F. J., and Marcus, L. F., 1993:** A revolution morphometrics. *Trends in Ecology and Evolution*, 8(4), 129-132.
- Rohlf, F. J., and Slice, D., 1990:** Methods for comparison of sets of landmarks. *Systematic Zoology*, 39, 40-59.
- Rohlf, F. J., 1990:** Morphometrics. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 21, 299–316.
- Rousseau, D. D., Schevin, P., Duzer, D., Cambon, G., Ferrier, J., Jolly, D., and Poulsen, U., 2006:** New evidence of long distance pollen transport to southern Greenland in late spring. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 141(3), 277-286.
- Slice, D. E., 2007:** Geometric morphometrics. *Annu. Rev. Anthropol.*, 36, 261-281.
- Slice, D. E., 2005:** Modern morphometrics. In *Modern morphometrics in physical anthropology*. Springer US.1-45.
- Suh, Y., Heo, K., and Park, C. W., 2000:** Phylogenetic relationships of maples (*Acer* L.; *Aceraceae*) implied by nuclear ribosomal ITS sequences. *Journal of Plant Research*, 113(2), 193-202.
- Sultan, S. E., 2003:** Phenotypic plasticity in plants: a case study in ecological development. *Evolution and development*, 5(1), 25-33.
- Tanai T., 1983:** Revisions of Tertiary *Acer* from East Asia. 北海道大学理学部紀要= *Journal of the Faculty of Science, Hokkaido University. Series 4, Geology and mineralogy*, 20(4), 291-390.

- Tanai T., 1978:** Taxonomical investigation of the living species of the genus *Acer*, based on vein architecture of leaves. Jour. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Ser. IV, vol. 18, no. 3, Mar., 1978. pp. 243-282.
- Tutin, T. G., Heywood, V. H., Burges, N. A., Moore, D. M., Valentine, D. H., Tutin, S. M., and Webb, D. A. 1978:** Flora Europaea Vol 2. Roseaceae to Umbelliferae. 238-239 p.
- Viscosi, V., and Cardini, A. 2011:** Leaf morphology, taxonomy and geometric morphometrics: a simplified protocol for beginners. PloS one, 6(10), e25630.
- Viscosi, V., Loy, A., and Fortini, P., 2010:** Geometric morphometric analysis as a tool to explore covariation between shape and other quantitative leaf traits in European white oaks.
- Viscosi, V., Fortini, P., Slice, D., Loy, A., Blasi, C., 2009:** Geometric morphometric analyses of leaf variation in four oak species of the subgenus *Quercus* (Fagaceae). *Plant Biosystems*, 143(3), pp.575–587.
- Webster, M. A. R. K., and Sheets, H. D., 2010:** A practical introduction to landmark-based geometric morphometrics. *Quantitative Methods in Paleobiology*, 16, 168-188.
- Wolfe, J. A., and Tanai, T., 1987:** Systematics, phylogeny, and distribution of *Acer* (maples) in the Cenozoic of western North America. 北海道大学理学部紀要= *Journal of the Faculty of Science, Hokkaido University. Series 4, Geology and mineralogy*, 22(1), 1-246.
- Yahi N., 2007 :** Les cédraies d’Algérie : phytosociologie, dynamique et conservation des peuplements. Thèse Doctorat ès science, USTHB, Alger, 265 p.
- Zelditch, M. L., Swiderski, D. L., and Sheets, H. D., 2012:** Geometric morphometrics for biologists: a primer. Academic Press. 443 p.

Annexe

Annexe 1 : Classification des sections du genre *Acer* (Huanget *al.*, 2002)

Les sections du genre <i>Acer</i>		
1- <i>Acer</i>	9- <i>Integrifolia</i>	17- <i>Platanoidea</i>
2- <i>Arguta</i>	10- <i>Lithocarpa</i>	18- <i>Pubescentia</i>
3- <i>Cissifolia</i>	11- <i>Macranta</i>	19- <i>Rubra</i>
4- <i>Grinnala</i>	12- <i>Macrophylla</i>	20- <i>Saccharina</i>
5- <i>Glabra</i>	13- <i>Negundo</i>	21- <i>Spicata</i>
6- <i>Goniocarpa</i>	14- <i>Palmata</i>	22- <i>Trifoliata</i>
7- <i>Hyptiocarpa</i>	15- <i>Parviflora</i>	
8- <i>Indivisa</i>	16- <i>Pentaphylla</i>	

Annexe 2 : Classification des espèces d'Erables présente en Algérie selon De Jong (1976) et Tutinet *al.*, (1978)

Espèces	De Jong 1976	Tutinet <i>al.</i> , (1978)
<i>A.monspessulanum</i> L.	Section : <i>Acer</i> Série : <i>Monspessulana</i> Pojark.	Section : <i>Goniocarpa</i> Pojark.
<i>A.opalus</i> Mill.	Section : <i>Acer</i> Série : <i>Monspessulana</i> Pojark.	Section : <i>Goniocarpa</i> Pojark.
<i>A.obtusatum</i> W. K.	/	Section : <i>Goniocarpa</i> Pojark.
<i>A.campestre</i> L.	Section : <i>Platanoidea</i> Pax. Série : <i>Platanoidea</i>	Section : <i>Platanoidea</i> Pax.

Résumé

La morphologie des feuilles de deux espèces d'Erables au Djurdjura (*Acer monspessulanum* et *A. obtusatum*) a été analysée par deux méthodes: la morphométrie classique et la morphométrie moderne par l'approche des points repères.

Dans le cas de *Acer monspessulanum*, les feuilles ont été récoltées au niveau de 2 stations représentant les deux extrémités des cédraies du Djurdjura (Azrou N'Thor et Tala-Guilef) à raison de 15 individus par station. Par individu, 4 orientations ont été considérées ; dans chacune, 2 rameaux ont été récoltés ; dans chaque rameau, 3 niveaux d'insertion des feuilles ont été retenus (basal, intermédiaire et apical) et pour chaque niveau d'insertion 2 feuilles ont été retenues pour les mesures. Chaque feuille, a fait l'objet de mesures morphologiques classiques moyennant 11 paramètres et de mesures par la morphométrie-géométrie à travers le choix de 11 points repères implantés sur 346 feuilles. Soit un total de 15840 mesures par la morphométrie classique et de 3806 par la méthode des points repères.

Dans le cas de *A. obtusatum*, deux stations ont été échantillonnées : Tala-Guilef sur le versant nord et Tikjda sur le versant sud. Le protocole de récolte et de mesures est comparable au précédent sauf que le nombre d'individus échantillonné par station est différent (5 arbres à Tikjda et 25 arbres à Tala-Guilef) et le niveau d'insertion des feuilles dans le rameau non pris en compte. Pour cette espèce, c'est un total de 600 feuilles qui ont été mesurées par 15 paramètres classiques et 15 points repères.

Des tests statistiques associés à l'analyse par la méthode des points repères ont été appliqués pour valider la précision des mesures et pour décomposer les sources de variation de la taille et de la conformation des feuilles (station, arbres, orientations, niveau d'insertion, feuille).

Chez *Acer monspessulanum*, la méthode classique comme la méthode des points repère ont abouti à une caractérisation concordante des feuilles, mais la 2^{ème} méthode est plus avantageuse. Parmi les facteurs pris en compte, le niveau d'insertion des feuilles sur les rameaux explique une part importante de la variation de la feuille (44%) suivi de l'effet arbre (22%) alors que l'effet station est négligeable.

En effet, la méthode moderne a révélé chez ce taxon, 2 types de conformations de la feuille selon leur insertion le long du rameau. Les feuilles basales ont une conformation caractérisée par un long pétiole ; associé à un limbe étroit ; à un angle formé par les nervures des lobes latéraux étroit ; et à un lobe apical court et étroit occupant 1/3 du limbe. Alors les feuilles terminales ont une conformation caractérisée par un pétiole très court, associé à un limbe grand et large ; à un angle formé par les nervures des lobes latéraux très grand ($>90^\circ$) et à un lobe apical plus long et plus large occupant 1/2 du limbe.

Elle a aussi révélé l'existence de deux morphotypes selon les arbres avec d'un côté, des arbres dont les feuilles ont une base tronquée ; un angle d'insertion des nervures des lobes latéraux étroit et un sinus formé par le lobe apical et le lobe latéral étroit ($<90^\circ$) et d'un autre côté, des arbres dont les feuilles ont une base cordée ; un angle d'insertion des nervures des lobes latéraux très large et un sinus formé par le lobe apical et le lobe latéral très large.

Chez *A. obtusatum*, la méthode moderne a révélé aussi une forte variabilité inter-arbres. En effet, l'angle des nervures des lobes inférieurs ; l'angle des nervures des lobes supérieurs ainsi que la forme du lobe apical se sont révélés variables entre les arbres.

Enfin, l'application d'une méthode de la morphométrie géométrie (i.e. méthode des points repères) à l'analyse de la morphologie des feuilles d'érables complète les limites de la méthode classique qui, du fait qu'elle s'appuie sur des mesures linéaires, ne prend pas en compte la conformation des feuilles.

Mots clefs

Djurdjura, *Acer monspessulanum*, *Acer obtusatum*, morphométrie, feuille, méthode des points repères, variation.

Abstract:

Leaf morphology of two Maple species in the Djurdjura (*Acer monspessulanum* and *Acer obtusatum*) is analyzed by two methods: a traditional and a modern one (i.e. geometric morphometrics by landmarks approach).

Leaves of *Acer monspessulanum* were sampled in two stands representing two edges of forest Cedar in the Djurdjura (Azrou n'Thor at the eastern side and Tala Guilef at the western side) respectively) on 15 trees per stand. Four orientations were considered per tree; in each, two shoots were harvested; on each shoot three leaf insertion levels were selected (basal, middle and apical) and for each level of insertion, two leaves were sampled. Each leaf was analyzed by 11 measurements in the case of Traditional Morphometrics and by 11 landmarks in the case of Geometric Morphometrics method. A total of 15840 measurements with Traditional Morphometrics and 3806 by Geometric Morphometrics were performed.

For *Acer obtusatum*, two stands were sampled: Tala Guilef on the Northern side and Tikjda on the Southern side of the Djurdjura. The sampling and measurement protocol is similar to the previous one but the number of trees sampled per stand is different (5 trees in Tikjda and 25 in Tala Guilef) and leaf insertion levels not considered. For this species, a total of 600 leaves, were jointly measured by 15 classical parameters and 15 landmarks.

For *Acer monspessulanum*, Traditional and Geometric Morphometrics resulted in a concordant characterization of leaves, but the second method is more advantageous since it allows description of leaf conformation. Among the factors taken into account, leaf insertion level on shoot explained a significant part of variation in leaf conformation (44%) followed by tree which explained 22% of such variation while the stand effect revealed negligible.

Indeed, the modern method revealed on such taxon, two leaf conformations according to leaf insertion along the shoot. The basal leaves are characterized by a long petiole, associated with a narrow blade; a narrow angle formed by principal and lateral rib; and a short and narrow apical lobe occupying 1/3 of the blade. The terminal leaves have a conformation characterized by a very short petiole; associated with a large and wide blade; a large angle formed by lateral ribs ($>90^\circ$) and a longer and wider apical lobe occupying 1/2 of the blade.

At tree level, this method also revealed the existence of two leaf morphotypes. On one hand, trees with leaves displaying a truncated base; a narrow insertion angle of lateral ribs and a narrow sinus ($<90^\circ$) formed by the apical and lateral lobe. On the other hand, trees with leaves displaying a strung base; a wide insertion angle of the ribs of the lateral lobes and a wide sinus formed by the apical lobe and the side lobe. On *A. obtusatum*, the modern method also showed high among tree variability for the insertion angle of ribs of the lower lobes; the insertion angle of ribs of the upper lobes and the shape of the apical lobe.

Finally, the application of a Morphometric Geometrics method (i.e. landmarks approach) to analysis of maples leaf morphology completely compensates the limitation of the traditional method solely based on linear measurements without consideration of leaf shape, .

Keywords: Djurdjura, *Acer monspessulanum*, *Acer obtusatum*, morphometry, leaf, landmarks approach, variation.