



POTENTIALITÉS, DYNAMIQUE ET GESTION D'UNE FORMATION ARBORÉE À GENÉVRIER THURIFÈRE (JUNIPERUS THURIFERA L.) DES ATLAS MAROCAINS:le cas de la vallée de l'Azzaden

Nicolas Montès

► To cite this version:

Nicolas Montès. POTENTIALITÉS, DYNAMIQUE ET GESTION D'UNE FORMATION ARBORÉE À GENÉVRIER THURIFÈRE (JUNIPERUS THURIFERA L.) DES ATLAS MAROCAINS:le cas de la vallée de l'Azzaden. Ecologie, Environnement. Université Toulouse le Mirail - Toulouse II, 1999. Français. NNT: . tel-00137746

HAL Id: tel-00137746

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00137746>

Submitted on 21 Mar 2007

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

N° Ordre:

UNIVERSITÉ TOULOUSE LE MIRAIL
UFR Sciences -Eco nomie - So ciété
Département Géographie - Aménagement

T H È S E

Présentée par

Nicolas MONTÈS

Pour obtenir le grade de
Docteur de l'Université Toulouse le Mirail
Spécialité *Géographie - Aménagement*

**POTENTIALITÉS, DYNAMIQUE ET GESTION D'UNE FORMATION
ARBORÉE À GENÉVRIER THURIFÈRE (JUNIPERUS THURIFERA L.)
DES ATLAS MAROCAINS:
le cas de la vallée de l'Azzaden**

Travaux réalisés au **Laboratoire d'Ecologie Terrestre (LET)**
Université Paul Sabatier de Toulouse

Soutenue le 28 septembre 1999, devant la Commission d'Examen composée de:

M. BARBERO (Rapporteur)
G. BERTRAND (Examineur)
F. BLASCO (Examineur)
Y. DJELLOULI (Rapporteur)
F. FROMARD (Examineur)
T. GAUQUELIN (Directeur de Thèse)
J. HUBSCHMAN (Examineur)

Professeur à l'Université d'Aix-Marseille (IMEP)
Professeur à l'Université Toulouse le Mirail (GEODE)
Directeur du LET de Toulouse
Professeur à l'Université du Maine - Le Mans (GREGUM)
Chargé de Recherches CNRS au LET de Toulouse
Maître de Conférences au LET/ UPS de Toulouse
Professeur à l'Université Toulouse le Mirail (GEODE)

Résumé : Dans la plupart des pays du Tiers-monde, et plus encore dans les zones montagneuses, l'Homme puise directement dans son environnement naturel les ressources nécessaires à sa survie. Ainsi, bien que rarement autarciques, les villages de la Haute montagne marocaine n'en sont pas moins tributaires de ce que leur offre le milieu, et plus précisément la forêt, que ce soit pour alimenter ou soigner le bétail, pour bâtir les maisons et les bergeries, ou encore pour se chauffer et faire la cuisine. Mais cette très forte dépendance vis à vis de l'arbre, à laquelle s'ajoute une forte croissance démographique, a un prix, comme en témoigne l'intense dégradation des écosystèmes forestiers.

A travers l'étude du peuplement à genévriers thurifères de la vallée de l'Azzaden (Haut Atlas, Maroc), nous nous sommes donc attachés (1) à préciser les potentialités et les ressources de cet écosystème méditerranéen de haute montagne: réserve ligneuse et productivité (développement d'une méthodologie originale non destructive d'estimation de la phytomasse), cycle du carbone et des éléments minéraux; (2) à déterminer le rôle du facteur anthropique dans les processus de dégradation des sols et de la végétation (modélisation de l'évolution régressive du peuplement), et dans les difficultés de régénération naturelle du Genévrier thurifère.

Au-delà de la portée locale d'une recherche ciblée sur une espèce menacée de disparition à court terme, et des implications écologiques, économiques et sociales de la déforestation d'une petite vallée du Haut Atlas, cette étude relève d'une problématique plus générale. La vallée de l'Azzaden peut, en effet, être considérée comme un modèle de fonctionnement d'un écosystème méditerranéen perturbé par l'action anthropique, les données obtenues renseignant plus généralement sur les problèmes globaux de la steppisation, du surpâturage, de l'épuisement des ressources énergétiques, de l'érosion des sols et des variations du stock carboné des milieux semi-arides.

Mots-clés: *Juniperus thurifera*, *Phytomasse*, *Minéralomasse*, *Stock carboné*, *Morphologie*, *Cartographie*, *Gestion*, *Modélisation*, *Dynamique*, *Haut Atlas*, *Maroc*.

Summary: In most of Third world countries, especially in mountain areas, humans take in their natural environment the resources they need to survive. So the villages of the Moroccan high mountains are dependent on the natural resources available in the environment, and more exactly in the forest, to feed or to treat the livestock, to build houses and sheepfolds or for heating and cooking. But this strong relationship between humans and trees, associated with the population growth induce a severe degradation of forest ecosystems.

In this study of a *Juniperus thurifera* woodland in a small valley of High Atlas Mountains in Morocco (Azzaden valley), we worked (1) to precise potentialities and resources of this high mountain mediterranean ecosystem: wood stock and productivity (with an original non destructive method for estimating biomass), carbon cycle and nutrients cycle; (2) to determine the influence of the anthropic factors on soil and vegetation degradation (elaboration of a regressive evolution model of the woodland), and on natural regeneration problems of *Juniperus thurifera*.

Beyond the importance of new data on a threatened species and of ecological, economical and sociological impact of the deforestation in a small High Atlas valley, this study has a more general interest. The Azzaden valley can be considered like a model to study a mediterranean ecosystem affected by anthropic degradation, and the data collected provide informations on various problems like steppization, overgrazing, energizing ressources, soil erosion and variations of carbon stock in mountain semi-arid environments.

Keywords: *Juniperus thurifera*, *Phytomass*, *Nutrient content*, *Carbon stock*, *Architecture*, *Cartography*, *Management*, *Model*, *High Atlas*, *Morocco*.

AVANT-PROPOS

C'est en 1993 que je fais la connaissance du Genévrier thurifère pour la première fois, dans le cadre d'un mémoire de maîtrise, sous la direction de Thierry GAUQUELIN (Maître de Conférences à l'Université Paul Sabatier). Je découvre alors dans la station pyrénéenne de la montagne de Rié, un petit arbre, un arbuste pourrait-on dire si l'on ne craignait de l'offenser. Un feuillage beaucoup plus amical que celui du Genévrier oxycèdre ou du Genévrier commun et un milieu ouvert où la progression n'est pas entravée par un sous bois dense, deux atouts qui augurent une phase de terrain agréable et aisée et endorment ma méfiance. Première ascension et première leçon: ne jamais sous estimer l'adversaire. Un soleil de plomb et une pente de plus de 40° sur ces marbres blancs qui font la réputation de la montagne me font regretter mon goût pour les milieux ouverts, et j'en viens déjà à envier la fraîcheur du sous bois dense et impénétrable que j'aperçois au pied de la montagne. On dit de la station de la montagne de Rié qu'elle est xérothermique, mais c'est seulement ce jour là que j'en compris tout le sens. Bientôt la pente s'accroît, les bras travaillent autant que les jambes, et il devient rapidement inutile de se baisser pour admirer la flore rupicole. Enfin, un litre d'eau plus tard nous rencontrons les premiers Thurifères, et c'est à ce moment que m'apparaît clairement l'une des stratégies de survie de cet arbre: l'inaccessibilité. Sur les barres rocheuses où il a trouvé refuge, peu d'espèces sont capables de venir lui disputer la place, et surtout pas les chênes pubescents en contrebas. Il est petit certes, mais sa robustesse force déjà le respect et l'évocation par T. GAUQUELIN ou W. BADRI d'individus de plusieurs mètres de circonférence au Maroc excite ma curiosité.

Lorsque deux ans plus tard, après un DEA réalisé à l'Université Toulouse le Mirail sur les reboisements de la Montagne Noire, T. GAUQUELIN me propose une Thèse sur les genévriers thurifères des Atlas marocains, les souvenirs de la montagne de Rié refont surface: un versant pratiquement toujours ensoleillé, une pente forte mais merveilleusement fleurie au printemps, et l'odeur entêtante du Thurifère. Mais, alors que je me vois déjà sur les pentes de l'Atlas, un problème reste à résoudre: le financement. Nous proposons donc, en relation avec l'Université Toulouse le Mirail, un dossier pour une allocation de recherche ciblée "pourtour méditerranéen". Le Thurifère parvient à se faire entendre, et nous obtenons du Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche cette bourse qui nous ouvre les portes du Royaume du Maroc.

Mes remerciements iront donc tout d'abord à T. GAUQUELIN pour m'avoir accordé sa confiance en me proposant cette thèse, et au Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche pour m'avoir donné les moyens de la réaliser dans de bonnes conditions.

La Renault 4L très chargée et accompagné de Valérie BERTAUDIERE avec qui je partage cette allocation, je m'élance sur la route du Thurifère, certain que la seule limitation que nous dépasserons, sera celle de la charge autorisée. Après un épisode mouvementé à la douane de Tanger, nous repartons pour notre destination finale, Marrakech.

Après quelques dizaines de kilomètres d'adaptation au code de la route marocain, nous parvenons sans trop de peine à éviter les mulets qui forcent la priorité ou à ralentir sur les tronçons de route reconvertis pour l'occasion en terrain de football, et après 40h de conduite presque ininterrompue depuis Toulouse, notre périple nous amène aux portes de Marrakech.

Là, je suis accueilli par Albert GALTIER et Fouad AMESTOUN, à qui je dois d'avoir grandement facilité mon installation à Marrakech et par ce biais d'avoir fait la connaissance de la famille EL OUARAZI, véritable famille d'adoption, qui a su rendre si agréable mon séjour au Maroc.

Après quelques jours d'adaptation, c'est en compagnie de Mohamed ALIFRIQUI, Maître assistant à l'Université Cadi Ayyad de Marrakech et de Valérie BERTAUDIERE que je découvre pour la première fois la vallée de l'Azzaden et ses genévriers thurifères. Difficile de croire que ces arbres d'une taille colossale sont de la même espèce que ceux de la montagne de Rié, et pourtant... Ici, inutile de froisser un rameau pour en faire ressortir le parfum. L'odeur du Thurifère est

omniprésente et plane sur tout le peuplement. Plus tard, nos missions de terrain en compagnie de Wadī BADRI (Maître assistant à la faculté des Sciences Ben M'Sik de Casablanca) et de El Houssein ZAOUÏ (doctorant), nous feront découvrir non seulement la Thuriféraie, mais aussi les villages qui parsèment cette magnifique vallée, et plus précisément celui de Tizi Oussem, où nous venons nous reposer le soir après les éprouvantes journées de travail. Et lorsque la fatigue se fait sentir, les paroles réconfortantes de W. BADRI ou le thé à la menthe de El H. ZAOUÏ s'ajoutent au magnifique spectacle qu'offrent les montagnes marocaines pour nous redonner courage.

Je les remercie donc tous sincèrement à la fois pour leur aide précieuse sur le terrain, leurs conseils avisés, pour m'avoir fait partager leur connaissance du milieu et de la végétation, mais également pour m'avoir fait découvrir une petite partie de la vie et de la culture Berbère.

Deux ans plus tard, me voici de retour à Toulouse, où la vaillante 4L retrouve une vie plus paisible après plusieurs trajets Toulouse-Marrakech, et de nombreux kilomètres parcourus sur les routes et les pistes marocaines. Le travail de laboratoire commence alors, aidé et soutenu par les compétences des membres du LET (Laboratoire d'Ecologie Terrestre de Toulouse, CNRS/Université Paul Sabatier), dirigé par François BLASCO qui m'a fait l'honneur de participer au jury de cette thèse.

Je tiens donc à remercier pour leur aide dans le domaine du traitement des images SPOT, Marie-France BELLAN et Jacques FONTES du LET, ainsi que Jean-Philippe GASTELLU du CESBIO. Pour l'analyse des sols et des végétaux, mes remerciements iront à Aomar BENMOUFFOK (LET) et Joseph DAGNAC (CESAC) qui m'ont été d'un grand secours. Mes plus sincères remerciements à Denise DEJEAN (LET), Alain BOURBOUZE (INRA de Montpellier) et Pierre DONADIEU (ENSP de Versailles) qui m'ont aidés dans ma recherche bibliographique.

Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude à Marcel BARBERO (Professeur à l'Université du d'Aix-Marseille) et Yamina DJELLOULI (professeur à l'Université du Maine, Le Mans) qui m'ont fait l'honneur d'être rapporteurs de cette thèse, ainsi qu'à Jacques HUBSCHMAN (Professeur à l'Université du Mirail de Toulouse), Georges BERTRAND (Professeur à l'Université du Mirail de Toulouse) et François FROMARD (Chargé de Recherches CNRS au LET) qui ont accepté d'en être les examinateurs.

Au cours de ces quatre années de thèse, ce que j'ai pu voir et comprendre du Genévrier thurifère m'a fasciné, car nul ne peut rester indifférent devant cet arbre. Il étonne le botaniste, il étonne le touriste, il étonne même le berger qui n'en revient pas de sa robustesse malgré les dégradations dont il fait l'objet. Tout en lui est spectaculaire: sa taille, ses nombreuses formes, sa longévité, son odeur, sa résistance, la dureté de son bois, son importance sociale et économique. Mais le Genévrier thurifère, arbre symbole de la haute montagne marocaine, est réfractaire à toute forme de recherche le concernant, et si c'est le respect qu'il inspire, c'est l'humilité qu'il enseigne, poussant le chercheur dans ses derniers retranchements. Si ce travail a pu aboutir, c'est grâce au soutien et aux encouragements de toutes les personnes citées dans cet avant-propos.

Je remercie plus particulièrement Émile et Odette MARTINEZ dont la gentillesse et les compétences en informatique m'ont permis à maintes reprises de sortir de l'impasse, et Thierry GAUQUELIN qui tout au long de cette thèse m'a soutenu et conseillé, et sans qui toute cette aventure n'aurait jamais commencée.

Enfin, parce que les remerciements sont parfois insuffisants, je dédie ce mémoire...

A VALERIE
A MES PARENTS

SOMMAIRE

INTRODUCTION	1
--------------------	---

1^{ERE} PARTIE: PRESENTATION GENERALE DU GENEVRIER THURIFERE ET DU SITE D'ETUDE	4
--	----------

1. LE GENEVRIER THURIFERE	4
<i>1.1. Chorologie générale</i>	4
<i>1.2. Systématique</i>	8
<i>1.3. Principaux caractères morphologiques</i>	9
2. LE SITE D'ETUDE	11
<i>2.1. Localisation géographique</i>	11
<i>2.2. Climat</i>	12
<i>2.3. Topographie</i>	12
<i>2.4. Géologie, pédologie</i>	14
<i>2.5. Principales formations végétales</i>	14

2^{EME} PARTIE: ÉVALUATION DE LA PHYTOMASSE EPIGEE ET DE LA PRODUCTIVITE DU THURIFERE ET DE LA PHYTOMASSE DES ESPECES LIGNEUSES ASSOCIEES.....	16
---	-----------

1. PLAN D'ECHANTILLONNAGE	16
<i>1.1. Carte de densité du couvert</i>	16
<i>1.2. Choix des placettes</i>	17
2. ÉVALUATION DE LA PHYTOMASSE EPIGEE ET DE LA PRODUCTIVITE DU THURIFERE A PARTIR D'UNE METHODE D'ECHANTILLONNAGE NON DESTRUCTIVE	18
<i>2.1. Méthodologie</i>	18
2.1.1. Étude de la phytomasse	18
2.1.1.1.Principe de la méthode.....	18
2.1.1.2.Échantillonnag (acquisition des photos).....	19

2.1.1.3.	Le calcul de l'échelle	20
2.1.1.4.	Calcul des volumes	21
2.1.1.5.	Calcul des densités	25
2.1.1.6.	Calcul de la phytomasse des arbres échantillonnés	27
2.1.1.7.	Calcul de la phytomasse du peuplement	29
2.1.2.	Étude de la productivité	29
2.1.2.1.	Principe de la méthode	30
2.1.2.2.	Détermination de l'accroissement radial annuel	30
2.1.2.3.	Le calcul de la productivité ligneuse pour les pixels B et H (branches verticales et horizontales)	30
2.1.2.4.	Le calcul de la productivité ligneuse pour le pixel F (Feuillage)	32
2.1.2.5.	Le calcul de la productivité ligneuse pour le pixel M (Couronne interne) ..	33
2.1.3.	Les caractéristiques dendrométriques	34
2.1.3.1.	La hauteur:	34
2.1.3.2.	La projection du houppier:	35
2.2.	Résultats et Discussion	37
2.2.1.	La phytomasse du Genévrier thurifère	37
2.2.1.1.	Densité des différents pixels:	37
2.2.1.2.	Phytomasse du peuplement	37
2.2.1.3.	Conclusion	48
2.2.2.	La productivité du Thurifère	50
2.2.2.1.	Densités apparentes des cernes	50
2.2.2.2.	Productivité ligneuse	50
2.2.3.	Les caractéristiques dendrométriques et le sex-ratio de la population	54
2.3.	Vérification de la méthode d'évaluation de la phytomasse	69
2.3.1.	Méthodologie	69
2.3.1.1.	Vérification indirecte: relations phytomasse / données dendrométriques ...	69
2.3.1.2.	Vérification directe	72
2.3.2.	Résultats et discussion	72
2.4.	Intérêts, limites et avantages de la méthode	75
3.	CARACTERISTIQUES MORPHOLOGIQUES DES GENEVRIERS THURIFERES : "ETUDE DES FORMES"	77
3.1.	Détermination des différents types morphologiques	79
3.2.	Le déterminisme des formes	83
3.2.1.	Relation Forme-Hauteur	83
3.2.2.	Le déterminisme sexuel	84

3.2.3. Le déterminisme altitudinal.....	85
3.2.4. Le déterminisme anthropique.....	87
3.3. Amélioration de l'estimation de la phytomasse par l'étude des formes	90
3.4. Conclusion.....	91
4. ÉVALUATION DE LA PHYTOMASSE DES XEROPHYTES.....	94
4.1. Méthodologie.....	94
4.2. Résultats et discussion.....	96
4.3. Conclusion.....	101
3^{EME} PARTIE: POTENTIALITES DU MILIEU: MINERALOMASSE ET STOCK CARBONE.....	103
1. ÉVALUATION DE LA MINERALOMASSE EPIGEE DU PEUPLEMENT	103
1.1. Méthodologie.....	103
1.1.1. Échantillonnage.....	103
1.1.2. Techniques d'analyse de la minéralomasse employées.....	104
1.2. Résultats et Discussion.....	104
1.2.1. La minéralomasse du Genévrier thurifère.....	104
1.2.1.1.Teneur en éléments minéraux des différents compartiments	104
1.2.1.2.Minéralomasse des différents compartiments.....	106
1.2.2. La minéralomasse des xérophytes.....	108
1.2.3. La minéralomasse du peuplement.....	109
1.3. Conclusion.....	111
2. DETERMINATION DU STOCK CARBONE AERIEN ET SOUTERRAIN DE LA VALLEE.....	114
2.1. Stock carboné aérien.....	114
2.1.1. Méthodologie	114
2.1.1.1.Détermination de la teneur en carbone organique des échantillons	114
2.1.1.2.Conversion phytomasse --> stock carboné.....	115
2.1.2. Résultats et discussion.....	115
2.1.2.1.Le pourcentage de carbone organique aérien	115
2.1.2.2.Le stock carboné aérien	116
2.2. Stock carboné souterrain	119

2.2.1. Méthodologie	119
2.2.1.1.Échantillonnage	119
2.2.1.2.Dosage du carbone organique du sol	120
2.2.1.3.Estimation du stock carboné du sol.....	120
2.2.1.4.Une autre méthode d'estimation du carbone organique: la formule de "Cabidoche" modifiée	121
2.2.2. Résultats et discussion.....	123
2.2.2.1.Caractéristiques édaphiques des sols de la Thuriféraie de l'Azzaden	124
2.2.2.2.La densité apparente du sol	127
2.2.2.3.Le pourcentage de carbone organique dans le sol	129
2.2.2.4.Le stock carboné.....	134
2.2.3. Conclusion.....	135
2.3. Synthèse des résultats de stock carboné aérien et souterrain.....	138

4^{EME} PARTIE: SYNTHESE CARTOGRAPHIQUE ET APPROCHE DIACHRONIQUE DE L'EVOLUTION DE LA THURIFERAIE ENTRE 1965 ET 1989..... 141

1. DEMARCHE METHODOLOGIQUE	141
1.1. Géoréférencement	141
1.2. Traitement de la photographie aérienne de 1965	142
1.2.1. Calcul de l'échelle	142
1.2.2. Élaboration de la carte de recouvrement du Thurifère (année 1965).....	142
1.3. Traitement de la scène SPOT de 1989.....	143
1.3.1. Les différentes images obtenues à partir de la scène SPOT.....	143
1.3.1.1.L'indice de végétation normalisé.....	143
1.3.1.2.Les images linéarisées (seuillage).....	144
1.3.1.3.La composition colorée	144
1.3.2. Élaboration de la carte de recouvrement du Thurifère (année 1989).....	146
1.4. Correction géométrique.....	146
1.5. Correction des surfaces par la pente	147
1.5.1. Élaboration de la carte des pentes	147
1.5.2. Correction des surfaces	148
1.5.3. Synthèse topographique	148

2.	ANALYSE DIACHRONIQUE DU PEUPLEMENT: PERIODE 1965 - 1989	148
3.	CONCLUSION	154
5^{EME}	PARTIE: ÉTUDE DES RELATIONS HOMME – THURIFERE	156
1.	LES UTILISATIONS DU GENEVRIER THURIFERE.....	156
1.1.	<i>L'utilisation du Genévrier thurifère en Espagne</i>	156
1.2.	<i>L'utilisation du Genévrier thurifère en France</i>	158
1.3.	<i>L'utilisation du Genévrier thurifère au Maroc</i>	160
2.	LES BESOINS EN BOIS ET LES RESSOURCES DISPONIBLES: BILAN.....	163
2.1.	<i>Évaluation des besoins en combustible</i>	163
2.2.	<i>Bilan et prévisions de l'évolution des stocks de bois disponibles.....</i>	166
	CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	173
	BIBLIOGRAPHIE.....	177
	ANNEXES.....	193

INTRODUCTION

Dans la plupart des pays du Tiers-monde, et plus encore dans les zones montagneuses, l'Homme puise directement dans son environnement naturel, les ressources nécessaires à sa survie. Ainsi, bien que rarement autarciques, les villages de la Haute montagne marocaine n'en sont pas moins tributaires de ce que leur offre le milieu, et plus précisément la forêt, que ce soit pour alimenter ou soigner le bétail, pour bâtir les maisons et les bergeries, ou encore pour se chauffer et faire la cuisine. Mais cette très forte dépendance vis à vis de l'arbre, à laquelle s'ajoute une forte croissance démographique, a un prix, comme en témoigne l'intense dégradation des écosystèmes forestiers. Et c'est précisément ce lien étroit unissant l'Homme à la forêt, qui suscite les plus vives inquiétudes, car l'état de dégradation avancé de certains peuplements arborés pose le problème de l'avenir de la forêt marocaine, et de celui des populations qui en dépendent. Mais si les mises en garde sont nombreuses, la question de l'échéance de la disparition éventuelle des formations forestières reste sans réponse.

C'est donc dans le but d'apporter des éléments de réponse précis à cette interrogation que nous nous sommes intéressés aux formations à genévriers thurifères (*Juniperus thurifera* L.) de la haute montagne marocaine, soutenus par une allocation de recherche thématique "Pourtour méditerranéen" du ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche. Cette essence, étudiée depuis de nombreuses années au Laboratoire d'Écologie Terrestre de Toulouse, constitue au Maroc des peuplements souvent dégradés, que nous avons choisi d'utiliser comme "modèle de dégradation" d'écosystèmes montagnards.

Pour ce travail, nous avons orienté notre choix sur une petite vallée du Haut Atlas Occidental, la vallée de l'Azzaden, dans le Massif du Toubkal, dans laquelle le Genévrier thurifère est très bien représenté. Plusieurs considérations ont guidé notre choix. En premier lieu, la localisation géographique: située au cœur de la chaîne du Haut Atlas, cette vallée est relativement isolée, seule une longue piste desservant les premiers villages en aval. Cet isolement est renforcé par les hauts sommets qui l'entourent, les cols permettant de communiquer avec les vallées voisines étant tous situés au-delà de 2000 m d'altitude. Il en résulte que l'influence de l'Homme sur le milieu, notamment à travers l'exploitation de la

réserve ligneuse que constituent le Genévrier thurifère et les xérophytes, est donc presque exclusivement le fait des villages de la vallée.

Mais ce sont aussi les données bibliographiques disponibles qui nous ont incités à choisir ce site d'étude. En effet, cette vallée a déjà fait l'objet d'études variées, tant écologiques que sociologiques ou démographiques. Ainsi, nous avons pu profiter des travaux réalisés sur le sol (Gauquelin & Dagnac, 1988), sur la végétation (Haloui, 1986; Gauquelin *et al.*, 1988; Gauquelin, 1989; Ouhammou, 1992; Ouhmidou, 1993; Ouhmidou *et al.*, 1994; Ouhammou *et al.*, 1996), sur l'organisation sociale des villages (Donadieu *et al.*, 1976; Hammoudi, 1977) et enfin sur la dynamique et l'évolution de la population de cette vallée (Hensens, 1975; Hammoudi, 1977).

Afin d'apporter des éléments nouveaux sur le rythme et les conséquences écologiques de la dégradation de ces formations pré-steppiques à genévriers thurifères, nous nous sommes fixés les objectifs suivants:

- (1) déterminer précisément les ressources de l'écosystème: phytomasse, minéralomasse, productivité et aussi stock carboné, qui mobilise actuellement une partie de la communauté scientifique dans l'optique d'une évaluation des changements globaux. Dans un milieu déjà fortement fragilisé, et considérant l'interdiction faite aux villageois de couper du bois, ce travail devait impérativement passer par l'élaboration d'une méthodologie nouvelle, non destructive, évitant l'abattage d'un grand nombre d'arbres, comme c'est le cas dans les études de phytomasse classiques.
- (2) cartographier précisément ces ressources à l'aide d'images satellitales, afin d'en étudier la répartition en fonction de la gestion de l'espace (position des villages et zones de parcours)
- (3) préciser la nature et les conséquences des dégradations observées: impact du pastoralisme et du prélèvement de bois de feu sur l'architecture des arbres, rôle de l'érosion, conséquences de l'ouverture du milieu sur les stocks carbonés souterrains, etc.

Dans un deuxième temps, à partir de la confrontation de ces données écologiques avec les données sociologiques et démographiques issues de la littérature, nous avons tenté:

- (1) de préciser le rôle social et économique du Genévrier thurifère: quels sont les usages qui sont faits de cet arbre, en quelle quantité s'effectuent les prélèvements ?

(2) d'étudier l'évolution de la Thuriféraie jusqu'à ce jour, par la comparaison d'images diachroniques (photographie aérienne et image satellitale) retraçant la dynamique du peuplement sur les dernières décennies.

(3) de réaliser un modèle permettant de prédire l'évolution de ce peuplement à court, moyen et long terme, afin de répondre aux questions concernant son avenir: est-il menacé de disparition, et dans cette éventualité, à quelle échéance ?

Tous ces résultats permettront de plus d'enrichir les bases de données internationales sur des écosystèmes très peu étudiés de ce point de vue, permettant d'affiner les modèles globaux dont la fiabilité dépend, dans une certaine mesure, de la prise en compte de ces écosystèmes jusqu'à présent négligés.

Après une première partie consacrée à la présentation du Genévrier thurifère et du site d'étude, nous aborderons les aspects méthodologiques et les résultats de l'estimation de la phytomasse épigée et de la productivité du Thurifère, avant de discuter, dans la deuxième partie du mémoire, des caractéristiques architecturales de cet arbre, et du rôle des xérophytes dans la réserve ligneuse du peuplement.

Dans la troisième partie, nous développerons les potentialités d'immobilisation des éléments minéraux dans les différentes parties de l'arbre, ainsi que dans les xérophytes, puis nous nous intéresserons aux capacités de stockage du carbone organique dans le sol et dans la partie épigée de l'écosystème.

Les résultats précédents sont ensuite synthétisés et présentés dans la quatrième partie, sous une forme cartographique, d'après une image SPOT de 1989, et comparés à ceux estimés pour l'année 1965, d'après une carte réalisée sur photographie aérienne.

Enfin, dans la cinquième partie, sont abordés le rôle social et économique du Genévrier thurifère, les prélèvements annuels dont il fait l'objet, ainsi que les perspectives d'avenir du peuplement.

1^{ERE} PARTIE: PRESENTATION GENERALE DU GENEVRIER THURIFERE ET DU SITE D'ETUDE

1. LE GENEVRIER THURIFERE

1.1. *Chorologie générale*

Le Genévrier thurifère est une espèce dont l'aire de répartition est limitée à la partie occidentale du bassin méditerranéen (cf. Figure 1). Présent en Italie, en France, en Espagne, au Maroc et en Algérie, cet arbre présente non seulement une distribution très morcelée, mais également très inégalitaire: suivant les pays, les surfaces occupées par le Genévrier thurifère varient de quelques centaines d'hectares à environ 150 000 ha. Les peuplements de Genévrier thurifère d'un seul tenant concernent généralement des superficies restreintes, accentuant de ce fait le caractère fragmenté de sa répartition.

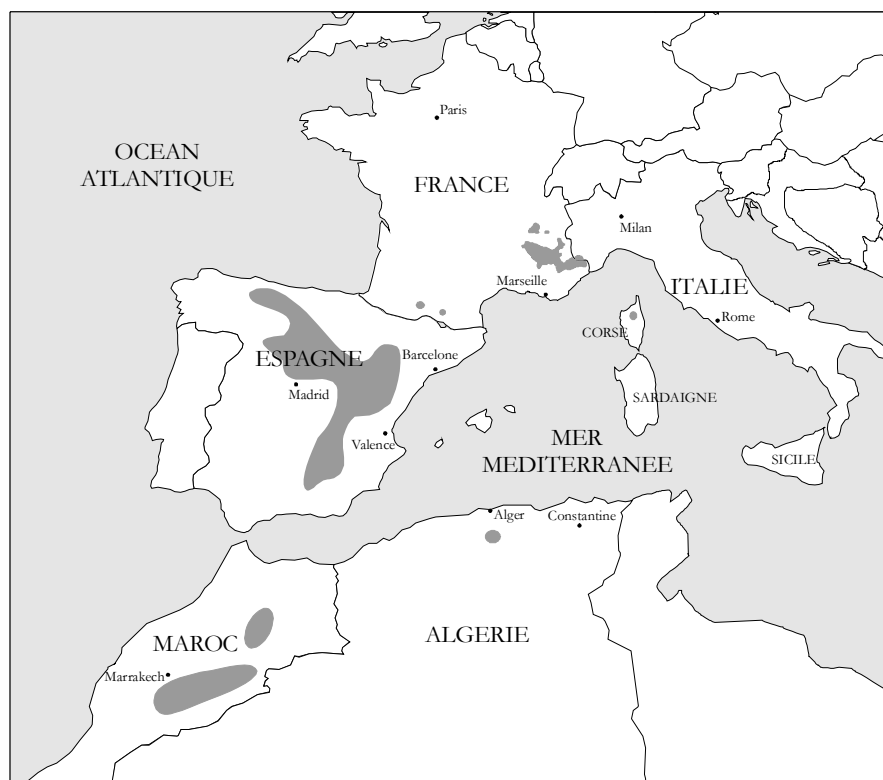


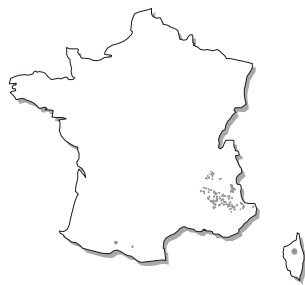
Figure 1: Carte de répartition du Genévrier thurifère

Le Genévrier thurifère en Espagne:



En Espagne, suivant les régions, le Genévrier thurifère est connu sous le nom de **sabina vera** (Aragon) (Braun-Blanquet & de Bolos, 1957), **sabina blanca**, **ratiza** (Blanco Castro *et al.*, 1997), certaines appellations étant très anciennes (**cedro hispanico**, **trabino** ou **trabina**). Mais le nom le plus largement répandu est celui de **sabina albar** (Castilla y León) ou encore de **enebro** (Blanco Castro *et al.*, 1997). Présent dans les régions de León (dont les peuplements de la Comarca de Luna (Blanco Castro *et al.*, 1997; Bertrand & Bertrand, 1999) constitue la limite occidentale) d'Albacete, de Murcia, de Guadalajara, de Cuenca, de Valencia, de Ciudad Real, de Teruel, de Soria, de Segovia et de Burgos, le Genévrier thurifère est le mieux représenté dans celles de Soria (30 000 ha), de Teruel (29 116 ha) et de Guadalajara (26 080 ha), le peuplement le plus étendu étant celui de "Campo de Montiel" dans la région d'Albacete (55 000 ha). Son aire géographique, très étendue mais discontinue, se présente donc sous la forme d'un croissant orienté nord-ouest — sud-est, dont la superficie est actuellement estimée à environ 150 000 ha, soit 1% du couvert forestier espagnol (Gauquelin *et al.*, 1999).

Le Genévrier thurifère en France:



En France, le Genévrier thurifère est localisé dans les Alpes, les Pyrénées et en Corse. On lui connaît de nombreux nom locaux, tels le **savinier** (Fournier, 1948), le **chaï** (Lathuillière, 1994), **loù savin** (Charras, 1993), **Mourenc** (Lathuillière, 1994), ou le nom plus ancien de **sabine en arbre**, ainsi que des appellations plus régionales: **cèdre d'Espagne**, **genévrier d'Espagne**, **Genévrier à encens** ou **Genévrier porte-encens** (Rameau *et al.*, 1993).

Au niveau de la chaîne alpine, l'abondante bibliographie concernant la découverte de stations à Genévrier thurifère révèle que cette espèce est présente dans six départements (Lathuillière, 1994a):

- Hautes Alpes (Braun-Blanquet, 1922; Breistroffer, 1937 et 1940; Offner & Breistroffer, 1948; Widmann, 1950; Archiloque & Borel, 1965; Meyer, 1981; Lavagne *et al.*, 1983)
- Alpes de Haute Provence (Guinier, 1929; Laurent, 1933; Breistroffer, 1946; Archiloque & Borel, 1965)
- Alpes Maritimes (Borel & Polidori, 1923; Barbero *et al.*, 1988)
- Savoie (Breistroffer, 1946)
- Isère (Guinier, 1929; Revol, 1937; Breistroffer, 1940; Offner & Breistroffer, 1948; Ozenda, 1966; Marciau, 1992)
- Drôme (Lenoble, 1924; Breistroffer, 1940; Archiloque & Borel, 1965)

Les nombreuses localités citées par les différents botanistes qui y ont herborisé, portent actuellement à environ 110 le nombre de stations où l'on rencontre cette essence. Cependant, il convient de distinguer deux types de formations à Genévrier thurifère: les "microstations" ne comptant que quelques individus, et les véritables peuplements tels ceux de Saint-Genis, Saint-André de Rosans, Remollon-Espinasses ou encore le plus connu d'entre eux, celui de Saint-Crépin dans les Hautes-Alpes (Lathuillière, 1994).

Dans les Pyrénées, les formations à Genévrier thurifère sont au nombre de deux (quelques pieds épars ont été trouvés dans d'autres localités, mais ils ne forment pas de véritable peuplement): celle du Quié de Lujat (Ussat les bains, Ariège) qui a été découverte très récemment (Guerby, 1993), et celle plus connue de la Montagne de Rié, située en Haute Garonne entre Marignac et St Béat (Coste & Soulié, 1913; Offner, 1922; Dupias, 1960; Bertaudière & Montès, 1993; Gauquelin & Lebreton, 1998).

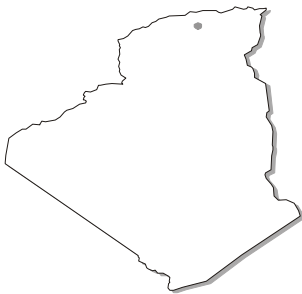
En Corse, cette espèce, du nom local de **soliu** ou **legnu di ferru** (Gamisans & Gruber, 1979; Conrad, 1986) a été découverte tardivement, par Escarel (1952), et se rencontre uniquement dans la moitié Nord de l'île, à l'intérieur des terres. Les principaux peuplements sont localisés dans le vallon de Pinnara près du village d'Ascu (De Litardière, 1956), dans la vallée de la Rudda (Gamisans, 1971), dans la vallée du Golu (Conrad, 1975) ainsi que dans la vallée de Prunicia (Gamisans & Gruber, 1979).

Le Genévrier thurifère en Italie:



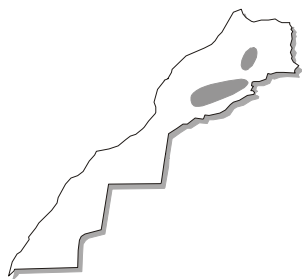
En Italie, cette espèce qui porte le nom de **ginepro turifero** ou **ginepro spagnolo** (Rameau *et al.*, 1993), a été découverte très récemment dans deux localités des Alpes (Barbero *et al.*, 1987 & 1988): Valdieri, dans la vallée du Gesso et vallée de Stura dans la région de Moïola.

Le Genévrier thurifère en Algérie:



En Algérie, cette cupressacée se rencontre exclusivement dans le massif de l'Aurès (Djbel Chélia), entre 1650 et 1800 mètres d'altitude, sous forme de peuplements très ouverts et dégradés. Les arbres sont âgés et la régénération naturelle y est presque inexistante (Chirio & Blanc, 1997).

Le Genévrier thurifère au Maroc:



Au Maroc, le Genévrier thurifère est connu des Berbères sous différents noms dont certains sont phonétiquement proches tels les noms d'**Androman** et d'**Andkrhoman** sous lequel on le connaît respectivement dans la vallée des Aït Bouguemez et du Tizi n'Tichka (Haut Atlas Central). Dans la haute vallée du Todrha, on lui donne le nom d'**Awal** ou encore de **Tawalt** (Auclair, 1991), alors que dans la vallée de l'Azzaden (Haut Atlas Occidental), on le nomme **Adrouman**. Cette espèce se rencontre essentiellement dans deux grands ensembles montagnards: le Haut Atlas et le Moyen Atlas (on trouve cependant quelques formations à Genévrier thurifère dans l'Anti Atlas). La superficie couverte par les thuriferaies marocaines est actuellement estimée à 20 000 ha (Barbero *et al.*, 1990b), répartis presque équitablement entre le Haut Atlas et le Moyen

Atlas (Boudy, 1958). Cependant, cette estimation doit être avancée avec prudence, car jusqu'à ce jour, aucune cartographie précise de ces formations n'a été réalisée.

Dans le Haut Atlas, en pieds isolés, le Genévrier thurifère se rencontre dès 1600 m et peut atteindre l'altitude de 3000 m (3150 m d'après Jahandiez, 1933), mais il ne constitue de véritables peuplements qu'entre 1700-1800 m et 2800 m d'altitude (Boudy & Emberger, 1934). Dans le Moyen Atlas, la limite inférieure des thuriferaies se situe généralement autour de 2000 m (Boudy, 1958).

Les peuplements les plus septentrionaux se situent dans le Moyen Atlas, au Tizi n'Retten, dans la région d'Ifrane (Boudy, 1958). C'est également dans le Moyen Atlas que l'on trouve la limite orientale de son aire de répartition au Maroc, à l'extrémité occidentale du massif du Bou Iblane (Peyre, 1979).

A l'ouest, le Genévrier thurifère s'étend jusque dans le massif de l'Erdouz (Emberger, 1934), alors que la limite sud se situe dans l'Anti Atlas, sur le versant nord du Jbel Sagho (Lemoine-Sebastian, 1965).

1.2. Systématique

Le Genévrier thurifère appartient à la famille des Cupressacées, Tribu des Juniperées, Genre *Juniperus*, Sous-genre *Sabina*, Section *Chinensioides* (Gaussen, 1968).

Jusqu'à un passé récent, l'espèce *Juniperus thurifera* L. était classiquement subdivisée en trois variétés: la variété *gallica* De Coincy correspondant aux peuplements européens (Alpes, Corse et Pyrénées); la variété *hispanica* Miller regroupant les peuplements de la péninsule Ibérique, et enfin la variété *africana* Maire, pour les individus d'Afrique du Nord (Maroc et Algérie).

Plus récemment, cette classification a fait l'objet d'une étude portant à la fois sur la teneur relative en prodelphinidine ainsi que sur le nombre de graines par galbule (Gauquelin *et al.*, 1988).

Ces travaux ont permis de redéfinir le découpage systématique de cette espèce. Il en ressort que deux sous espèces ont pu être différenciées selon ces critères:

- *Juniperus thurifera* L. subsp. *africana* G.-I.H.-L. pour les populations d'Afrique du Nord
- *Juniperus thurifera* L. subsp. *thurifera* G.-I.H.-L. pour les populations européennes

Au sein des populations européennes, trois chimiovars ont été discriminés:

- le chimiovar *thurifera* qui rassemble les populations d'Espagne et des Pyrénées
- le chimiovar *gallica* qui concerne les peuplements des Alpes
- le chimiovar *corsicana*, limité à la Corse

1.3. Principaux caractères morphologiques

Le Genévrier thurifère est un arbre (ou arbuste) généralement dioïque, bien que dans certaines stations des Alpes françaises et en Corse, des individus monoïques aient été rencontrés (Borel & Polidori, 1983; Conrad, 1986), de même qu'en Espagne et dans le Moyen Atlas (Gauquelin, communication personnelle). Suivant les stations, les individus sont de taille très variable. Les individus les plus hauts, jusqu'à 20m, se rencontrent généralement en Espagne (Blanco Castro *et al.*, 1997), mais les plus gros sont incontestablement au Maroc, certains individus atteignant jusqu'à 16 m de circonférence basale (Emberger, 1938; Fromard & Gauquelin, 1993).

Cette espèce présente un port très variable, sous l'influence de différents facteurs (endogènes et exogènes), que nous étudierons dans le chapitre "Caractéristiques morphologiques des genévriers thurifères : étude des formes", page 77. Le feuillage, sempervirent, est constitué de feuilles en écailles, allongées et aiguës, opposées et disposées sur quatre rangs, réunies en ramules plus ou moins quadrangulaires (Rameau *et al.*, 1993). Les écailles portent sur la face dorsale une glande sécrétrice, qui confère au Genévrier thurifère son odeur si particulière.

Les cônes femelles (galbules) sont charnus, subglobuleux, de couleur noir bleuâtre (cf. Planche 1, p. 10, Photo n° 1), et contiennent 2 à 4 graines suivant la variété (bien que selon Gauquelin *et al.* 1987, les Thurifères du Maroc ne contiennent généralement qu'une seule graine), dont la maturité est atteinte au bout de deux ans.

Les fleurs mâles sont réunies en inflorescence à la partie terminale des ramules, et formant un châton condensé de forme globuleuse (cf. Planche 1, p. 10, Photo n° 2).



Photo n° 1: Galbules de Genévrier thurifère



Photo n° 2: Fleurs mâles de Genévrier thurifère

Planche 1

2. LE SITE D'ETUDE

Nous présenterons ici les données physiques et phytogéographiques de cette vallée. L'aspect humain (démographie, nombre de villages, etc.) sera abordé dans la cinquième partie intitulée "Étude des relations Homme-Thurifère", p. 156.

2.1. Localisation géographique

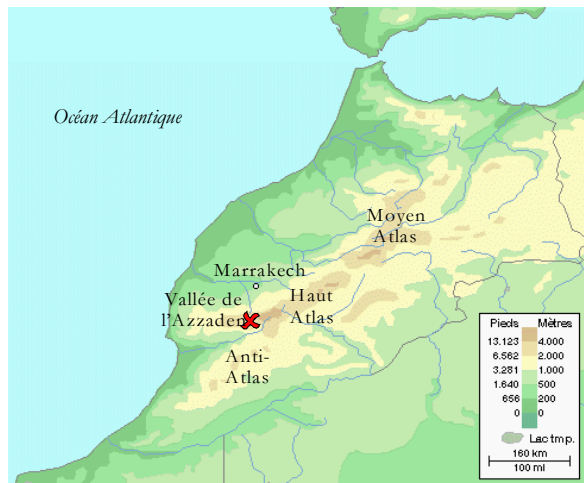


Figure 2

La thuriféraie que nous avons choisi d'étudier est celle de la Vallée de l'Azzaden (cf. Photo n° 3), située dans le Haut Atlas Occidental (plus précisément le Haut Atlas de Marrakech), au pied du Jbel Toubkal (4167 m), point culminant du Haut Atlas, du Maroc mais également de l'Afrique du Nord (cf. Figure 2). Cette vallée, limitrophe du parc national du Toubkal (Ouhammou *et al.*, 1996) d'orientation générale sud-est → nord-ouest (31°14' N, 7°98' W), couvre une superficie

estimée à 6150 ha, sans correction due aux pentes (Donadieu *et al.*, 1976).

L'Azzaden prend sa source au col de Tizi N'Melloul (3875 m) et après un parcours sud-nord, oblique en direction de l'Ouest au niveau du village de Ouirgane, puis conflue avec l'Oued N'Fis qui rejoint la plaine du Haouz (cf. Figure 3).

Le peuplement de Genévrier thurifère occupe ici l'étage bioclimatique semi-aride à hiver froid. Il se développe jusqu'à une altitude de 2600 m, certains individus isolés



Photo n° 3: Thuriféraie de l'Azzaden

atteignant 2800 m voire 3000 m. La zone d'étude porte sur la thuriféraie "sensu stricto". Nous n'avons donc pas tenu compte des secteurs dans lesquels elle entre en mélange avec le chêne vert, notamment sur les marges ouest et nord de la vallée.

2.2. Climat

Protégée des masses d'air humides en provenance du nord-ouest par les contreforts de l'Atlas, les précipitations sont faibles (533 mm enregistrés à la station de l'Assif N'Aït Mizane, vallée voisine), bien que l'enneigement hivernal soit fréquent, déterminant son appartenance au domaine semi-interne alticole (Haloui, 1986). Les dénivellations étant importantes font que le froid ne s'exprime donc pas avec la même intensité dans toute la vallée, l'estimation des minima obtenue par extrapolation sur la période 1925-1949 par Hammoudi (1977) révélant une différence de 5° entre Azerfsane situé à l'entrée de la vallée (-0,5°, 1380 m) et Tamsoult situé plus en amont (-5,5°, 2300 m).

2.3. Topographie

Cette vallée profonde, aux fortes pentes (moyenne d'environ 30°), est entaillée de multiples ravins souvent asséchés, mais qui drainent, lors des fortes pluies, les massifs de Tazaghart, Aourirt N'Irg, Adrar Takherkhort (rive gauche) et de Aguelzim, Adrar Adj, Tasghimout, Adrar Agouni Aourit N'Igouine (rive droite) (Haloui, 1986). Les voies d'accès sont donc peu nombreuses et se résument à la vallée elle-même à laquelle on accède par une longue piste s'arrêtant à l'entrée de la vallée, et à plusieurs cols très élevés (entre 2000 et 3000 m) situés sur la rive droite et permettant de rejoindre la vallée voisine d'Aït Mizane. Les conditions d'accès sont donc relativement difficiles, nécessitant au départ de Marrakech 1h de route, 1h30 de piste et autant de marche avant d'atteindre le village de Tizi Oussem situé à proximité de la Thuriféraie.

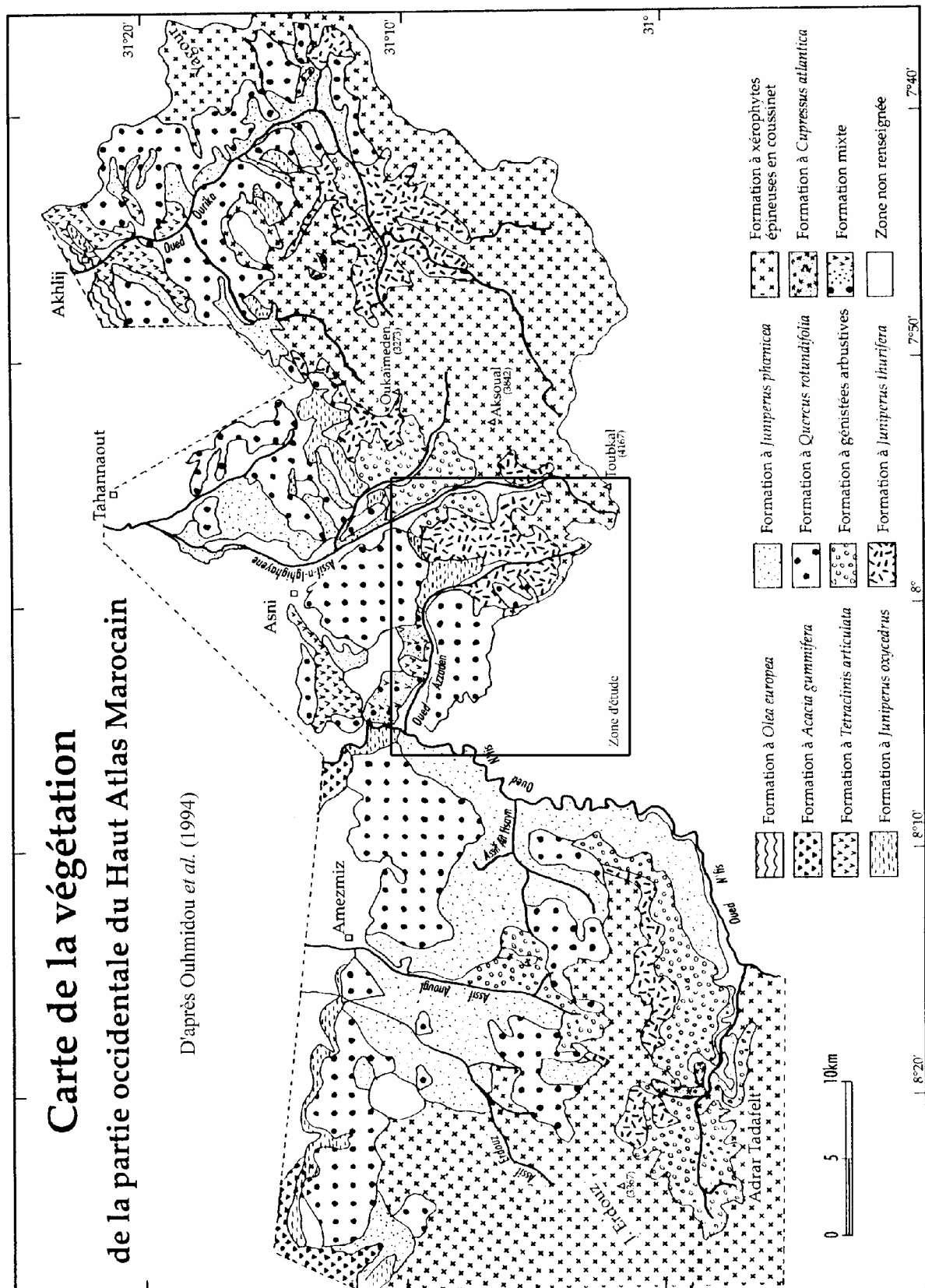


Figure 3

2.4. Géologie, pédologie

D'un point de vue géologique, on peut distinguer deux grands ensembles: l'un très majoritairement représenté, constitué de matériaux primaires (Adoudounien, Cambro-ordovicien et Précambrien), et l'autre ensemble plus restreint, composé de matériaux rocheux Permo-triasiques (Donadieu *et al.*, 1976). Il en résulte deux grands types de terrains: des schistes présents sur la quasi-totalité de la vallée, et des affleurements de grès rouges du permotrias localisés dans la partie basse de la vallée, au nord de Tizi Oussem, sur la rive droite (Proust, 1973). En dehors des sols des terrasses cultivées et de très rares sols de pozzines, la grande majorité de la couverture édaphique est constituée de sols peu évolués que nous décrirons en détail au chapitre "Caractéristiques édaphiques des sols de la Thuriféraie de l'Azzaden", page 124.

2.5. Principales formations végétales

La répartition des différentes formations végétales rencontrées dans la vallée est liée aux étages bioclimatiques (au sens défini par Emberger, 1939), eux même directement en liaison avec le gradient altitudinal, excepté lorsque des effets de versant viennent engendrer des conditions microclimatiques perturbant la succession altitudinale des différentes formations.

On retrouve dans l'Azzaden les principales formations végétales du Haut Atlas qui montrent un étagement classique décrivant cinq ensembles qualifiés par Donadieu *et al.* (1976) d'étages de végétation, qui sont, du fond de la vallée aux sommets:

➤ formation à Genévrier de phoenicie (*Juniperus phoenicea*) et thuya (*Tetraclinis articulata*). Ce groupement ne dépasse pas l'altitude de 1500m et se localise principalement à l'entrée de la vallée, au niveau du village de Ouirgane. Il correspond à l'étage bioclimatique semi-aride frais de basse altitude. On y trouve, entre autres, les taxons suivants: *Lavandula atlantica*, *Cistus villosus*, *Lavandula dentata*, *Pistacia lentiscus* et *Thymus satureoides*.

➤ formation à Chêne vert (*Quercus ilex*) et à Genévrier oxycèdre (*Juniperus oxycedrus*). L'iliciaie peut présenter différents aspects en fonction de l'intensité de la dégradation: futaies hautes et denses (par exemple sur les sommets en face du village de Tizi Oussem), ou à l'inverse, taillis bas ne dépassant guère deux mètres, au voisinage du village de Ouirgane. Cette formation est liée à l'étage bioclimatique subhumide froid. D'un point de vue

floristique, on note la présence d'*Arbutus unedo*, de *Crataegus laciniata*, ou encore de *Cirsium echinatum*.

➤ formation à Genévrier oxycèdre (*Juniperus oxycedrus*) et Rétame (*Retama dasycarpa*). Ce groupement correspond à une zone de transition entre la chênaie à *Quercus ilex* et les formations semi-arides de l'altitude supérieure (formations à Genévrier thurifère et Adénocarpe). Il se développe entre 1500 et 1800m d'altitude et correspond à l'étage bioclimatique semi-aride froid. Les éléments floristiques se développant dans cette ambiance climatique sont, entre autres, *Adenocarpus anagyriifolius*, *Ormenis scariosa*, *Bupleurum spinosum*, *Stipa nitens* ou encore *Linaria ventricosa*.

➤ formation à Genévrier thurifère (*Juniperus thurifera*) et *Genista florida*. Cet étage semi-aride très froid, voit la disparition des éléments plus sensibles aux basses températures comme le Chêne vert et l'Adénocarpe (Donadieu *et al.*, 1976). Il correspond à la zone de prédilection du Genévrier thurifère qui ne connaît pas de compétition avec d'autres espèces arborées. Cette formation se développe entre 1800 et 2800 m d'altitude, avec tout au long de ce gradient altitudinal, un remplacement progressif des espèces telles que *Lavandula depressus*, *Nepeta atlantica*, *Genista florida* var. *maroccana* ou *Thymus pallidus*, par des xérophytes telles que *Cytisus balansae*, *Alyssum spinosum*, *Ormenis scariosa* ou *Bupleurum spinosum*. C'est une formation pré-steppique par excellence (Quézel & Barbero, 1981), décrite comme "une formation arborée lâche, dont la sous strate ne possède pratiquement plus d'éléments exclusivement forestiers, mais sont au contraire envahis par des espèces pérennes à affinités steppiques, et dont les sols sont peu évolués, souvent tronqués en surface" (Barbero *et al.*, 1990b). C'est dans la limite supérieure de cette formation que se réalise le passage du milieu pré-steppique au milieu steppique, par péjoration des conditions thermiques (Barbero *et al.*, 1990b).

➤ formation à xérophytes épineuses en coussinet. Les formations végétales que l'on rencontre à ces altitudes (> 2400 m) présentent une convergence de forme vers une architecture dite "en coussinet", donnant un aspect moutonneux à cette strate chaméphytique. Les espèces arborées sont absentes, les éléments floristiques les plus caractéristiques de cet étage de Haute montagne étant représentés par *Cytisus balansae* et *Alyssum spinosum*.

2^{EME} PARTIE: ÉVALUATION DE LA PHYTOMASSE EPIGEE ET DE LA PRODUCTIVITE DU THURIFERE ET DE LA PHYTOMASSE DES ESPECES LIGNEUSES ASSOCIEES

1. PLAN D'ECHANTILLONNAGE

Dans cette étude, les même placettes ont été utilisées pour le prélèvement d'échantillons variés destinés aux analyses suivantes: estimations de phytomasse, estimations de productivité, estimations du stock carboné aérien et souterrain, analyses pédologiques, analyses dendrométriques et analyse morphologique.

La première partie du plan d'échantillonnage (choix des placettes) est donc commune et sera traitée une seule fois. Le nombre et la nature des échantillons prélevés dépendant du type d'analyse, la deuxième partie du plan d'échantillonnage (prélèvements) sera traitée dans les chapitres correspondants.

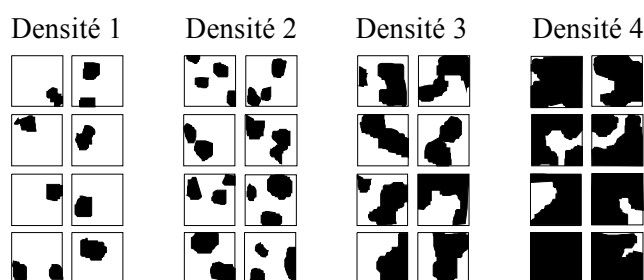
Nous avons choisi de baser notre plan d'échantillonnage sur une cartographie du peuplement en fonction du pourcentage de recouvrement des arbres. En effet, les différentes analyses à effectuer semblaient toutes directement ou indirectement liées à la densité du couvert arboré. Ainsi, la productivité, la minéralomasse et le stock carboné aérien sont dépendants de la phytomasse aérienne, elle-même étant liée, dans une certaine mesure au recouvrement des arbres. L'évaluation du stock carboné souterrain repose quant à elle directement sur le calcul du pourcentage de recouvrement du fait des conditions micro-édaphiques particulières régnant sous la couronne des arbres (Gauquelin & Dagnac, 1988).

1.1. Carte de densité du couvert

L'objectif de ce travail était de produire une carte simplifiée de la densité du couvert arboré de la vallée à partir d'un nombre réduit de classes de recouvrement, pour permettre de localiser précisément les placettes échantillons sur le terrain.

Cette carte de densité du couvert a été réalisée en utilisant comme support la mission aérienne la plus récente sur la zone d'étude, celle de 1965, les secteurs échantillonnés ayant fait l'objet d'une réactualisation ultérieure sur le terrain.

Sur cette photo, nous avons appliqué une grille de maille d'1mm x 1mm (correspondant approximativement à une surface de 2500 m² sur le terrain), le choix de la maille étant le résultat d'un compromis entre lisibilité et précision. Ainsi que le préconisent Pardé & Bouchon (1988), pour chaque maille, nous avons déterminé la classe de densité de couvert par comparaison visuelle avec une échelle de référence que nous avons préalablement définie (cf. Figure 4). Cette dernière est composée de quatre classes, exprimant des densités relatives, les densités absolues n'étant déterminées qu'après échantillonnage et calcul des surfaces de projection des houppiers.



Echelle de densité de couvert

Figure 4

A partir de la carte obtenue, nous avons réalisé un échantillonnage stratifié (Crépin & Johnson, 1993) s'appuyant sur les quatre classes de densité de couvert ainsi définies.

1.2. Choix des placettes

Dans chacune de ces quatre zones, quatre placettes circulaires ont été choisies aléatoirement (10 m de rayon pour la zone de fort recouvrement, 15 m de rayon pour les deux zones intermédiaires, 20 m de rayon pour la zone de faible recouvrement), dans le secteur Est de la vallée, plus accessible. La surface échantillonnée couvre ainsi au total une superficie de 11 938 m².

Dans chacune de ces placettes, le nombre, la nature et les méthodes de prélèvement seront adaptés aux différents types d'analyses à conduire.

2. ÉVALUATION DE LA PHYTOMASSE EPIGEE ET DE LA PRODUCTIVITE DU THURIFERE A PARTIR D'UNE METHODE D'ECHANTILLONNAGE NON DESTRUCTIVE¹

Dans l'étude qui va suivre, nous emploierons indistinctement le terme de biomasse et celui de phytomasse pour exprimer le poids sec de la matière végétale épigée de l'écosystème. Le terme de productivité sera quant à lui employé dans le sens restrictif de la productivité ligneuse. La productivité du feuillage ainsi que les chutes de litières ne sont donc pas prises en compte.

2.1. Méthodologie

2.1.1. Étude de la phytomasse

2.1.1.1. Principe de la méthode

Compte tenu de la grande variabilité structurale du Genévrier thurifère, de l'état de dégradation avancé de ces peuplements, ainsi que des mesures de protection dont il fait l'objet, les méthodes traditionnelles d'estimation de la phytomasse qui impliquent la coupe rase d'un grand nombre d'individus représentatifs du peuplement, sont apparues inadaptées à une telle étude. Il s'est donc avéré nécessaire de développer une méthodologie nouvelle, basée sur un échantillonnage non destructif des arbres.

La méthode que nous avons élaborée s'appuie sur le logiciel commercial Microsoft® Excel² pour Windows® 95³ et fonctionne à l'aide de trois fichiers principaux: un fichier source agencé sous forme d'une grille permettant la saisie des données, un fichier de traitement des

¹ Cette méthodologie nouvelle est reprise dans l'article suivant: Montès N., Gauquelin T., Badri W., Bertaudière V., El H. Zaoui (1999) - A non-destructive method for estimating above-ground forest biomass in threatened woodlands. *Forest Ecology and Management* (sous presse).

² Microsoft® Excel version 7.0, © 1985-1995 Microsoft Corporation.

³ Microsoft® Windows 95®, 1981-1995 Microsoft Corporation.

Elle repose sur six grandes étapes:

- Échantillonnage: photographie de chaque arbre selon deux directions perpendiculaires, récolte d'échantillons des différents compartiments de l'arbre (branches et feuilles), et mesures dendrométriques
- Calcul de l'échelle des photographies
- Détermination du volume des différents compartiments de l'arbre (troncs, rameaux, feuillage...)
- Détermination de la "densité apparente" de ces différents compartiments
- Calcul de la phytomasse des différents compartiments
- Validation de la méthode

2.1.1.2. Échantillonnage (acquisition des photos)

Dans chacune des 16 placettes, chaque arbre est photographié sous deux angles décalés de 90° afin de tenir compte de l'asymétrie axiale, omniprésente chez ces genévriers (cf. Figure 5). En effet, selon l'angle de prise de vue, la silhouette de l'arbre peut être très variable.

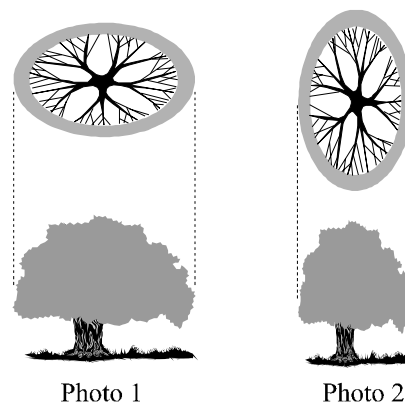


Figure 5

Ces arbres méplats présentent en coupe transversale une section elliptique. Or, la surface de l'ellipse est égale à πab où a et b sont les demi-axes (Pardé & Bouchon, 1988). Si l'on considère l'arbre selon son côté le plus étroit, pour une hauteur donnée, la surface du houppier sera πa^2 . Selon son côté le plus large, à cette même hauteur, la surface sera πb^2 . La

seule moyenne mathématique permettant de retrouver la surface de l'ellipse est donc la moyenne géométrique (M).

En effet: $M = \sqrt{\pi a^2 \times \pi b^2}$ soit encore $M = \pi ab$, surface de l'ellipse. Le même raisonnement peut s'appliquer aux volumes.

Le calcul estimé du volume de l'arbre sera donc le résultat de la moyenne géométrique entre le volume obtenu pour la première photo et celui obtenu pour la seconde.

Afin de déterminer ultérieurement l'échelle de la photo, il faut placer une toise graduée au pied de l'arbre à photographier (cf. Photo n° 4). La hauteur, le nombre de tiges vivantes, le nombre de tiges coupées, la circonférence des tiges à la base et le sexe seront également relevés en vue de l'étude dendrométrique du peuplement.

Le nombre d'échantillons prélevés pour les différents compartiments est variable et dépend de la nature du pixel étudié. Pour cette raison, les différents échantillonnages seront détaillés lors de la détermination de la densité apparente des différents compartiments.

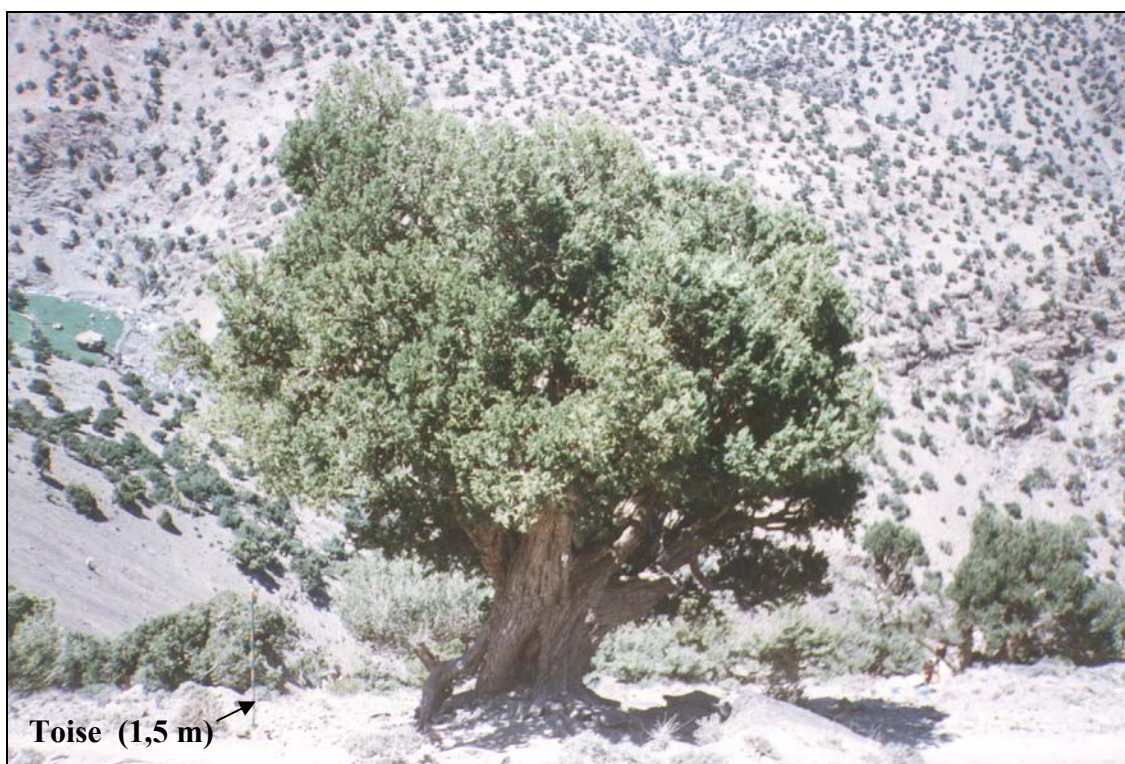


Photo n° 4: Exemple de "photo échantillon"

2.1.1.3. Le calcul de l'échelle

Ici, le calcul de l'échelle n'est pas un simple rapport entre la taille de l'arbre sur la photo et la taille réelle de l'arbre sur le terrain. En effet, l'échelle dépend non seulement de ces deux paramètres mais aussi de la taille des mailles de la grille et de la résolution employée lors du scannage de la photo.

L'échelle se calcule donc de la manière suivante:

$$E = \left(\frac{D}{\left(\frac{R}{100} \right) \times y} \right) \times C$$

où:

E: Échelle

D: distance sur le terrain en mètres

R: résolution utilisée lors du scannage (en dpi)

y: distance sur la photo en mm

C: taille d'une cellule de la grille en mm

Remarque: la résolution utilisée lors du scannage est diminuée d'un facteur 100 car, par exemple, une résolution de 200dpi revient à doubler la taille de la photo affichée à l'écran (400dpi la quadruple, etc.).

Donc le facteur multiplicateur est égal à $R / 100$ (où R = résolution de la photo en dpi).

Une fois l'échelle obtenue, on peut passer au calcul des volumes, qui diffère suivant les types de pixels.

2.1.1.4. Calcul des volumes

Chaque photo est scannée et importée en fond d'Excel (la numérisation des photos peut-être évitée en utilisant un appareil photo numérique). On y superpose alors une grille dont la maille (cellule) est préalablement définie (le maillage résulte d'un compromis entre degré de précision et visibilité de la photo. Nous avons opté pour une maille de 4,15 mm). Chaque

maille de cette grille peut être assimilée à un "pixel" auquel sera attribué un code relatif aux différentes parties de l'arbre. Quatre types de pixels ont ainsi été définis. A chacun d'eux correspond un code alphanumérique:

- Tronc et branches verticales ou sub-verticales Pixel **B** (pour **B**ranches)
- Tronc et branches horizontales ou sub-horizontales..... Pixel **H** (pour **H**orizontales)
- Feuillage..... Pixel **F** (pour **F**euillage)
- "Couronne interne" Pixel **M** (pour **M**ilieu de la couronne)

Dans chaque cellule de la feuille Excel, on note donc le code du pixel correspondant à la zone de l'arbre observée. Par exemple, si c'est une zone de feuillage, on note dans Excel, à l'endroit correspondant, la lettre **F**, si c'est une partie ligneuse (tronc ou branche) on note la lettre **B** ou **H**. Le pixel **M**, quant à lui, n'est pas directement codé. Son volume est déduit de celui du pixel **F**.

Par l'intermédiaire de commandes créées dans Excel (Macros), les codes alphanumériques sont remplacés successivement par la valeur 1, ce qui permet le calcul du volume des différents types de pixels.

Le volume est calculé par ligne. L'arbre est visuellement découpé en "tranches" de hauteurs identiques.

2.1.1.4.1. Le volume du pixel B (Branches)

Ce pixel correspond aux parties ligneuses (troncs, branches) en position verticale ou sub-verticale.

Pour chaque ligne, le programme fait la somme de chaque suite ininterrompue de pixels qui codent pour la valeur B. Le chiffre obtenu correspond au diamètre (D) d'une branche ou d'un tronc. On considère alors ce secteur comme étant de section circulaire et on lui applique la formule du volume du cylindre:

$$V = \frac{1}{4} \pi \times D^2 \times h$$

Toutes les sections circulaires sont ensuite additionnées pour une même ligne. (cf. Figure 6).

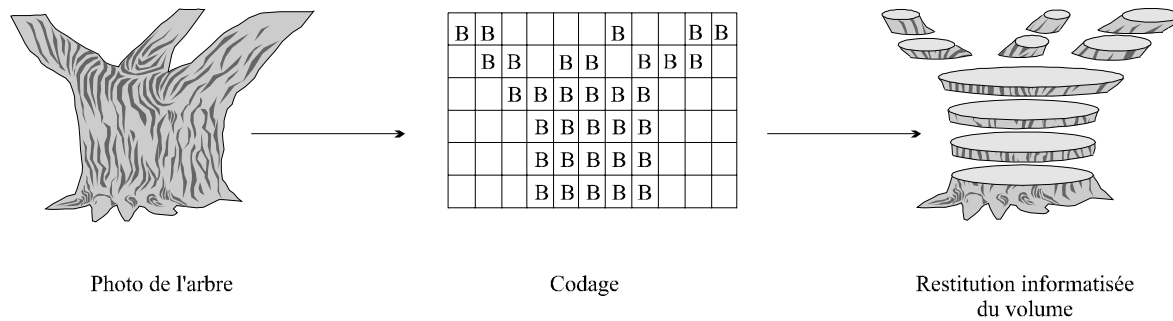


Figure 6

Ainsi, le volume des branches et troncs à une hauteur h (v_h), est égal à:

$$v_h = \sum_1^n (0.25 \times \pi \times d_n^2)$$

où n = nombre de sections circulaires pour la ligne considérée.

Le volume total correspond donc à la somme des volumes par ligne:

$$V_{total} = \sum_1^h v_h$$

2.1.1.4.2. Le volume du pixel H (branches Horizontales)

Ce pixel correspond aux parties ligneuses (troncs, branches) en position horizontale ou sub-horizontale. La méthode de calcul est la même que celle employée pour le pixel B, mais les calculs ne se font plus en ligne mais en colonne.

2.1.1.4.3. Le volume du pixel F (Feuillage)

Ce pixel correspond aux parties feuillées de l'arbre. Le calcul du volume des organes chlorophylliens est basé sur une observation préalable de l'architecture des arbres. En effet, la densité du feuillage freine progressivement la pénétration de la lumière de la partie externe vers la partie la plus interne de la couronne. Le feuillage constitue donc un "anneau" chlorophyllien à la périphérie de la couronne. La largeur de cet anneau apparaît relativement constante d'un arbre à l'autre et a été obtenue en moyennant les valeurs mesurées sur 20 arbres à des hauteurs variables. Vers le centre, après cet "anneau chlorophyllien", on trouve des branches de taille variable constituant ce que l'on a appelé la "couronne interne" (cf. Figure 7).

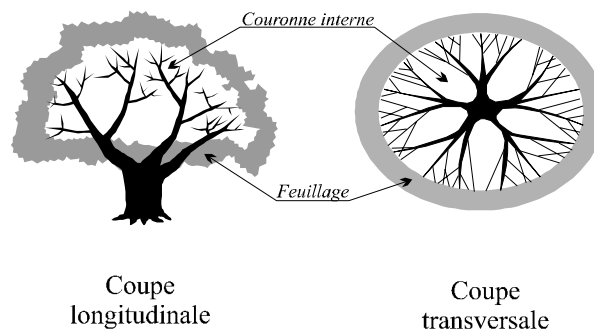


Figure 7

Le volume de feuillage à une hauteur donnée va donc correspondre au volume total de la couronne (V_1) auquel il faut retrancher le volume de la couronne interne (V_2).

Les volumes sont calculés à partir des diamètres selon la formule: $V = 0.25 \times \pi d^2 \times h$ où $h=1$ car correspond à la hauteur unitaire (hauteur d'un pixel ou cellule de la grille).

D'où:

$$V_f = V_1 - V_2$$

Soit:

$$V_f = \left(\frac{1}{4} \pi d_1^2 \right) - \left(\frac{1}{4} \pi d_2^2 \right)$$

Mais, $d_2 = d_1 - 2x$ où x est la profondeur du feuillage, donc:

$$V_f = \left(\frac{1}{4} \pi d_1^2 \right) - \left(\frac{1}{4} \pi (d_1 - 2x)^2 \right) = \pi x (d_1 - x)$$

2.1.1.4.4. Le volume du pixel M (Milieu de couronne)

Ce pixel correspond à la "couronne interne", notion définie précédemment. Il représente donc une partie "invisible" de l'arbre et de ce fait n'est pas directement codé. Son volume est donc déduit de l'équation précédente et s'exprime ainsi:

$$V_m = \frac{1}{4} \pi (d_1 - 2x)^2$$

En raison de sa nature, ce pixel est présent uniquement dans les arbres dont le rayon de la couronne est supérieur à la profondeur de pénétration du feuillage.

2.1.1.5. Calcul des densités

Les volumes des différents type de pixels calculés, il devient nécessaire de connaître leur densité pour obtenir la phytomasse de l'arbre. Pour cela, partir d'échantillons prélevés sur le terrain, on détermine le volume qu'ils occupent, et connaissant leur poids (après séchage à l'étuve à 85°C à poids constant), on en déduit ensuite leur densité avec la formule: $d = \frac{Pds}{Vol.}$

2.1.1.5.1. Densité du pixel B et H

Pour les parties ligneuses, la densité a été calculée sur 10 échantillons de taille différente, prélevés sur des arbres différents. Pour chacun d'eux, le volume a été mesuré par immersion (Martin, 1984), et une correction a été appliquée en pesant les échantillons avant et après immersion, afin d'estimer le volume d'eau retenu dans l'écorce (Bisch, 1986). La densité a été calculée après détermination du poids sec des échantillons (séchage à l'étuve pendant 3 jours à 85°C).

2.1.1.5.2.Densité du pixel F

La mesure de la densité du pixel F est une mesure de densité apparente. En effet, le volume occupé par le pixel F englobe non seulement feuilles et rameaux, mais également les espaces vides situés entre les rameaux. Vingt échantillons ont été prélevés au hasard (sur des arbres différents) dont le diamètre maximal des branches était de 2 cm. Les échantillons provenant d'arbres mâles et femelles n'ont pas été séparés, car nous avons estimé que le poids et le volume des cônes femelles étaient trop faible pour induire des différences sensibles de la densité. Le volume de chaque échantillon a été calculé de la même manière que le volume des différents compartiments de l'arbre, en scannant et en codant les photographies prises sous deux angles perpendiculaires. La connaissance du poids sec (séchage pendant 2 jours à 85°C) nous a ensuite permis de déterminer la densité de l'échantillon.

2.1.1.5.3.Densité du pixel M

De même que pour le pixel F, la densité du pixel M correspond à une densité apparente. En effet, ce pixel représente la couronne interne et code donc pour des zones contenant des branches et des espaces vides.

Pour estimer la proportion du volume occupé par les branches ou le tronc par rapport à ces espaces vides (ou degré "d'encombrement"), nous avons émis l'hypothèse que le volume des branches et troncs était proportionnel au volume de la couronne interne. Ainsi, ce degré "d'encombrement" de la couronne interne par les parties ligneuses serait voisin d'une constante et résulterait d'un équilibre entre la colonisation des espaces vides par les branches et la compétition "inter-branches". Cet équilibre dynamique est donc alimenté d'une part par l'élimination progressive des jeunes rameaux qui ne parviennent pas à maintenir leurs organes chlorophylliens à la périphérie de la couronne, et d'autre part par l'accroissement radial annuel des branches contrebalancé par une augmentation annuelle du volume de la couronne. Cette dynamique de la couronne des arbres a été étudiée, pour d'autres espèces, par Switzer *et al.* (1968) et Ranger *et al.*, (1992).

La densité apparente du pixel M est donc le rapport entre la phytomasse des organes ligneux présents à une hauteur donnée, et le volume de la couronne interne à cette hauteur.

Pour estimer cette densité, dix arbres ont été échantillonnés au hasard. Pour chacun d'eux, nous avons mesuré le diamètre de tous les troncs, branches, et rameaux, à la base et au sommet de la couronne. Pour chaque diamètre, on applique la formule du volume du cylindre ($V = \frac{1}{4} \pi d^2 \times h$).

Les diamètres étant mesurés au pied à coulisse, le volume est de ce fait surestimé, car les circonvolutions que l'on rencontre sur le pourtour de la section réduisent le volume réel sans en réduire le diamètre (Duplat & Perrotte, 1981; Pardé & Bouchon, 1988).

La biomasse correspondante est donc également surestimée (E_b), mais apparaît relativement constante d'un arbre à l'autre ($E_b=22.0\%$). Le facteur de correction (C) qu'il faut appliquer aux diamètres est donc: $C = -E_d = -\sqrt{E_b} = -\sqrt{22.0} = -4.6\%$

C : Facteur de correction

E_d : Diamètre surestimé

E_b : Biomasse surestimée

La somme des valeurs obtenues donne le volume de bois présent à cette hauteur de la couronne. En multipliant par la densité du bois précédemment calculée, on obtient la phytomasse de bois dans le volume de la couronne interne. On peut donc en déduire la densité apparente du pixel M.

2.1.1.6. Calcul de la phytomasse des arbres échantillonnés

Les valeurs de phytomasse sont directement déduites des calculs précédents par la formule:

$$P = V \times d$$

où P : phytomasse

V : Volume des différents pixels

d : densité des différents pixels

En fonction de la catégorie des différents pixels, nous allons obtenir des phytomasses par compartiments: troncs/branches, rameaux, feuilles et galbules.

2.1.1.6.1. Le compartiment "troncs/branches"

Ce compartiment regroupe les phytomasses obtenues après codage des pixels B, H et M.

2.1.1.6.2.Le compartiment "rameaux"

La phytomasse des rameaux est obtenue à partir de la phytomasse du pixel F. En effet, le pixel F correspond à la partie terminale des branches, c'est à dire non seulement aux feuilles mais aussi aux rameaux qui les portent. Lors de la pesée des différents échantillons, nous avons séparé les différentes fractions, permettant ainsi d'obtenir le pourcentage pondéral moyen des rameaux ($\emptyset < 2$ cm) dans le pixel F. Il suffit d'appliquer ce pourcentage à la phytomasse du pixel F pour obtenir celle des rameaux.

2.1.1.6.3.Le compartiment "feuilles"

De même que pour les rameaux, la phytomasse des feuilles est obtenue en appliquant le pourcentage pondéral des feuilles du pixel F à la phytomasse obtenue pour ce type de pixel.

2.1.1.6.4.Le compartiment "organes reproducteurs"

La phytomasse de ce compartiment a été limitée aux organes reproducteurs femelles (les galbules) et ceci essentiellement pour deux raisons: la première est que la régénération de la population dépend directement de la phytomasse des galbules. La seconde est que la taille réduite et le nombre très important des cônes mâles rend leur récolte très longue.

Le Genévrier thurifère étant un arbre dioïque, les mesures de phytomasse des organes reproducteurs s'appliquent donc uniquement aux individus femelles, et selon le même principe que précédemment, utilise le pourcentage pondéral moyen de galbules dans les échantillons du pixel F.

Les échantillons ayant été prélevés au mois de novembre, les seules galbules présentes sur l'arbre sont celles de l'année en cours (Roques *et al.*, 1984).

A partir des résultats de la phytomasse totale et des organes ligneux, nous avons tenté de mettre en évidence des corrélations (simples et polynomiales) entre la phytomasse estimée et

les paramètres dendrométriques mesurés (hauteur de l'arbre, circonférence basale, circonférence à 1,3m, nombre de tiges, projection du houppier, etc.).

2.1.1.7. Calcul de la phytomasse du peuplement

L'échantillonnage est celui décrit au chapitre 1 de la deuxième partie (page 16). Il consiste donc en 16 placettes choisies au hasard, et réparties dans quatre classes de densité de couvert. Dans chacune d'elles, tous les arbres ont été échantillonnés soit un total de 102 individus. Pour passer de la phytomasse des arbres à celle des placettes puis à celle du peuplement, nous avons utilisé les surfaces estimées de chaque classe de recouvrement par le Thurifère. Pour cela, nous nous sommes basées sur le résultat cartographique obtenu d'après la scène SPOT du 06/05/89, et abordé dans le chapitre "Synthèse cartographique des données de phytomasse, minéralomasse et stock carboné", page 141, dont les valeurs sont les suivantes:

recouvrement par le Thurifère: 10% → Surface: 819 ha

recouvrement par le Thurifère: 23% → Surface: 1088 ha

recouvrement par le Thurifère: 29% → Surface: 260 ha

recouvrement par le Thurifère: 76% → Surface: 17 ha

2.1.2. Étude de la productivité

La productivité d'un peuplement forestier est le résultat de l'interaction de plusieurs composantes que M'Hirit (1982) définit ainsi:

- Composantes biologiques de la station: Composition spécifique, variabilité génétique, aptitudes physiologiques (fertilité de l'espèce, concurrence, nutrition, etc.)
- Composantes écologiques: microclimat (topographie, altitude exposition, etc.), caractéristiques édaphiques (propriétés physiques et chimiques du sol).
- Composantes anthropiques: effets positifs ou négatifs (traitements sylvicoles, incendies, dégradations, etc.)
- Composantes dendrométriques: âge du peuplement, densité d'arbres, forme des arbres, etc.

Le but de cette étude n'est pas de préciser le rôle de chacune de ces composantes dans la productivité de la station, leurs interactions étant trop nombreuses pour permettre de les isoler. Nous nous sommes donc uniquement attaché à quantifier la productivité ligneuse de

cette formation arborée, afin de mieux caractériser ces écosystèmes méditerranéens d'altitude, et de pouvoir comparer ultérieurement cette productivité aux prélèvements de bois par la population. Les estimations de productivité ont été limitées aux organes ligneux du Genévrier thurifère, la productivité des xérophytes n'est donc pas prise en compte dans cette étude.

2.1.2.1.Principe de la méthode

La méthode employée pour estimer la productivité a été élaborée à partir de celle mise au point pour l'estimation de la phytomasse. Pour cela, il est nécessaire de déterminer pour chaque pixel, le volume de bois produit annuellement. Connaissant déjà la densité du bois, nous pourrions alors en déduire l'accroissement en phytomasse. Cette étape passe donc au préalable par la détermination de l'accroissement radial annuel de l'arbre (ou épaisseur du cerne annuel).

2.1.2.2.Détermination de l'accroissement radial annuel

L'accroissement radial annuel moyen que nous avons utilisé pour la détermination de la productivité du Thurifère est de 1 mm, valeur issue des premières estimations obtenue sur cet arbre dans la vallée de l'Azzaden (Bertaudière, communication personnelle). Cette valeur semble en accord avec l'accroissement radial annuel moyen de 1,4 mm mesuré sur les arbres de la station voisine de l'Oukaïmeden par Bertaudière (1999), qui bénéficient de conditions climatiques plus favorables et d'une dégradation anthropique plus faible.

2.1.2.3.Le calcul de la productivité ligneuse pour les pixels B et H (branches verticales et horizontales)

Le calcul de la biomasse du cerne d'accroissement annuel pour ces deux types de pixels passe par la détermination du volume de bois produit.

2.1.2.3.1. Le volume du cerne d'accroissement annuel

Le volume se calcule de la même façon que la phytomasse du feuillage précédemment décrite, mais cette fois nous ne cherchons plus à calculer le volume d'un "anneau chlorophyllien" mais celui d'un "anneau ligneux", d'épaisseur connue. Ce volume est donc égal au volume total de bois produit au cours de n années, auquel il faut soustraire le volume de bois produit pendant n-1 années:

$$V_c = V_n - V_{n-1}$$

où: V_c : Volume du cerne

V_n : Volume de bois produit pendant n années

V_{n-1} : Volume de bois produit pendant n-1 années

Soit, pour une hauteur égale à l'unité:

$$V_c = \left(\frac{1}{4} \pi d_n^2 \right) - \left(\frac{1}{4} \pi d_{n-1}^2 \right)$$

d_n : diamètre de la tige pour l'année en cours (tige âgée de n années)

d_{n-1} : diamètre de la tige l'année précédente (tige âgée de n-1 années)

Mais sachant que $d_{n-1} = d_n - 2x$ où x correspond à la largeur du cerne (exprimée en mètres):

$$V_c = \left(\frac{1}{4} \pi d_n^2 \right) - \left(\frac{1}{4} \pi (d_n - 2x)^2 \right) = \pi x (d_n - x)$$

soit avec $x=0,001$:

$$V_c = 0.001\pi(d_n - 0,001)$$

Ce calcul est effectué pour chaque ligne de la grille de codage dans le cas du pixel B et pour chaque colonne dans le cas du pixel H.

La somme des lignes et des colonnes permet d'obtenir le volume total du cerne.

2.1.2.3.2. La densité du bois

La densité du bois utilisée est celle employée pour l'estimation de la phytomasse, et déterminée par immersion selon la méthode décrite dans le chapitre "Densité des pixel B et H", page 25.

2.1.2.3.3. La productivité ligneuse

Connaissant la densité du bois, nous pouvons en déduire la productivité ligneuse pour ces deux catégories de pixels par la formule: $P_c = V_c \times D$

où: P_c : Phytomasse du cerne annuel; V_c : Volume du cerne; D : Densité du bois

2.1.2.4. Le calcul de la productivité ligneuse pour le pixel F (Feuillage)

Le principe du calcul du volume du cerne d'accroissement annuel du pixel F (diamètre maximal des branches: 2 cm) est basé sur le même principe que celui du pixel B et H. Les mêmes types d'échantillons que ceux ayant servi au calcul de la densité du pixel F, sont d'abord photographiés afin d'en déterminer le volume (V_1). Puis, ils sont débarrassés des parties chlorophylliennes. Le "squelette ligneux" est alors photographié sous deux angles perpendiculaires, les photos étant alors traitées selon la même méthode que celle appliquée aux arbres entiers. Le programme fait donc une estimation du volume de bois que constitue cet échantillon, et donc une estimation du volume du cerne d'accroissement annuel (V_2). Les ramifications inférieures à 2 mm de diamètre sont considérées comme étant le produit d'une année de végétation, et ne sont donc pas codées, mais prélevées et pesées, leur phytomasse (P_1) étant directement ajoutée à celle du cerne annuel (P_2). En utilisant la densité du bois déterminée précédemment, on calcule le poids total du cerne annuel ($P_1 + P_2$). On en déduit ensuite la densité apparente en le divisant par le volume total de l'échantillon de départ (V_1). L'estimation de la productivité ligneuse du pixel F est alors calculée en multipliant cette densité apparente par le volume du pixel F de l'arbre.

2.1.2.5. Le calcul de la productivité ligneuse pour le pixel M (Couronne interne)

De même que pour l'estimation de la biomasse du pixel M, l'évaluation de la productivité correspondant à ce secteur de l'arbre passe par trois étapes successives: détermination du volume du pixel M, de "la densité apparente du cerne" et enfin de la phytomasse correspondante.

2.1.2.5.1. Le volume du pixel M

Il correspond au volume de la couronne interne, déjà calculé lors la détermination de la densité du pixel M.

2.1.2.5.2. La "densité apparente du cerne"

Cette étape nécessite la connaissance préalable du volume de bois produit dans la couronne interne. Pour cela, nous allons nous appuyer sur les échantillons ayant servis au calcul de la densité de ce type de pixel. En effet, lors de l'échantillonnage, nous avons mesuré pour 10 arbres et à deux hauteurs différentes, le diamètre de toutes les branches de la couronne interne. Pour connaître le volume de bois produit à une hauteur donnée, il suffit donc de calculer pour chacune de ces n branches le volume du cerne annuel, selon la même démarche que celle ayant servi au calcul de la productivité pour les pixels B et H, en utilisant la même valeur moyenne d'accroissement radial annuel.

Pour une hauteur h , le volume total du cerne annuel dans la couronne interne est donc:

$$v_h = \sum_1^n \pi x (d_n - x)$$

v_h : Volume du cerne annuel à une hauteur h

d_n : diamètre de la branche

x : largeur du cerne (mètres)

En multipliant cette valeur par la densité du bois, on obtient la phytomasse de bois présente à cette hauteur. Le volume de la couronne interne a déjà été calculé pour la détermination de la densité du pixel M. La "densité apparente du cerne" dans la couronne interne (D_c) est donc le rapport entre la phytomasse du bois produit annuellement à une hauteur donnée P_c , et le volume de la couronne interne à cette hauteur (V_{ci}).

$$D_c = P_c / V_{ci}$$

2.1.2.5.3. La productivité

Pour chaque arbre codé, il suffit d'appliquer au volume du pixel M calculé, la "densité apparente du cerne", pour en déduire la productivité ligneuse de la couronne interne de l'arbre.

$$P_c = V_c \times D$$

où: P_c : Phytomasse du cerne annuel; V_c : Volume du cerne; D : Densité apparente du cerne

2.1.3. Les caractéristiques dendrométriques

Le programme de calcul de la phytomasse et de la productivité permet également le calcul des deux paramètres dendrométriques que sont la hauteur des arbres et la projection du houppier. Les méthodes employées pour l'estimation de ces deux paramètres fonctionnent sur le même principe.

2.1.3.1. La hauteur:

Pour le calcul de la hauteur, après avoir codé la photo, pour chaque ligne non vide de la grille de codage, on attribue la valeur 1. La somme de toutes les lignes, corrigée par l'échelle de la photo, donne la hauteur de l'arbre en mètres. Sur des pentes faibles, on peut utiliser la

moyenne arithmétique des hauteurs calculées sur les deux photos du même arbre. Sur forte pente, le calcul de la hauteur ne doit s'effectuer que sur la photo dont l'angle de prise de vue est perpendiculaire au sens de la pente, afin d'éviter les erreurs de parallaxe.

2.1.3.2. La projection du houppier:

Le principe est le même que pour l'estimation de la hauteur, mais le calcul ne s'effectue plus en ligne mais en colonne, et non plus sur une seule photo mais sur les deux. A chaque colonne non vide, on affecte la valeur 1, la somme des colonnes donnant, après correction par l'échelle, la surface du houppier.

Compte tenu de l'asymétrie axiale de la couronne évoquée plus haut (cf. Figure 5), il convient d'utiliser la moyenne géométrique des valeurs obtenues pour chaque photo. Concernant les photos prises perpendiculairement au sens de la pente, il faut préalablement réaliser une correction par la pente de la projection du houppier. En effet, lorsque la déclivité est importante, la surface de projection du houppier au sol est supérieure à celle projetée sur une surface horizontale (cf. Figure 8). Cette correction s'obtient en divisant la surface du houppier en projection horizontale (PHp1') par le cosinus de la pente α .

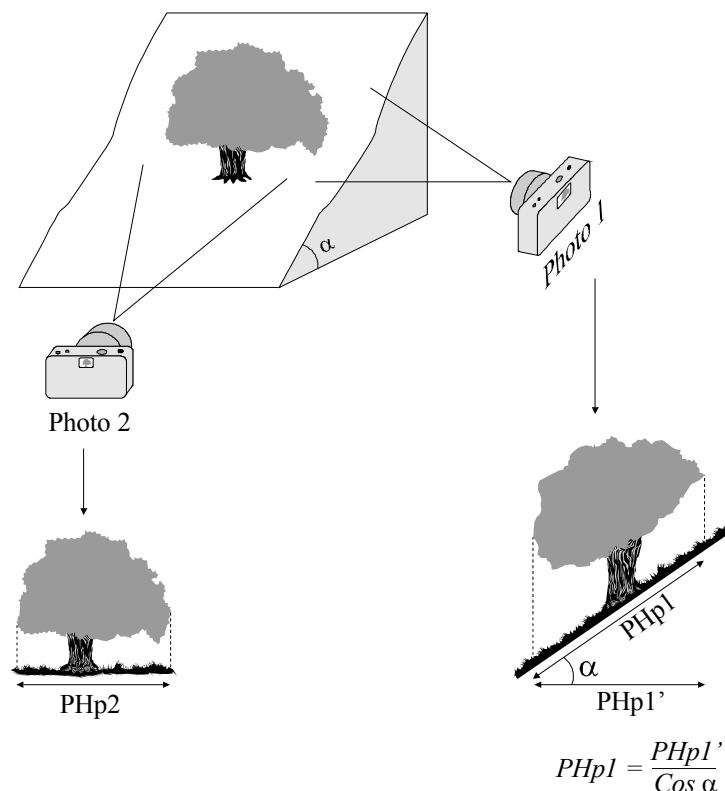


Figure 8: Approche méthodologique de l'estimation de la projection du houppier

La formule finale de la valeur de la projection du houppier, calculée selon deux axes (soit deux photos) sur un terrain en pente s'exprime donc ainsi:

$$PHp = \sqrt{PHp1 \times PHp2} = \sqrt{\frac{PHp1'}{\cos \alpha} \times PHp2}$$

Où:

PHp1: Projection du houppier sur la pente selon l'axe de prise de vue 1

PHp1': Projection horizontale du houppier selon l'axe de prise de vue 1

PHp2: Projection du houppier selon l'axe de prise de vue 2

α : Valeur de la pente en degrés

2.2. Résultats et Discussion

2.2.1. La phytomasse du Genévrier thurifère

2.2.1.1. Densité des différents pixels:

Les densités apparentes des pixels F (feuillage) et M (couronne interne) sont faibles car, elles correspondent à des zones de l'arbre dans lesquelles on trouve beaucoup d'espaces vides entre les branches ou entre les feuilles (cf. tableau ci-dessous). L'écart type peut atteindre 25% du fait de la grande hétérogénéité de ces compartiments.

La densité du bois mesurée pour les pixel B et H (614,7 kg/m³) est du même ordre de grandeur que celle donnée pour le Genévrier thurifère en France (600 à 700 kg/m³) (Venet, 1987).

Pixels	Densité (kg/m ³) $\pm \sigma$
B et H	614,70 $\pm$ 38,90
F	9,51 $\pm$ 2,49
M	15,66 $\pm$ 2,77
σ = écart type	

Chez les autres espèces du genre *Juniperus*, on trouve des densités similaires. Chez le Genévrier commun (*Juniperus communis* L.), la masse volumique du bois est estimée entre 500 et 700 kg/m³, tandis que chez le Genévrier du Kenya (*Juniperus procera* Hochst), elle est comprise entre 550 et 600 kg/m³ (Collardet & Besset, 1988). Chez le Genévrier de Virginie (*Juniperus virginiana* L.), elle est en revanche plus faible, variant de 450 à 550 kg/m³.

2.2.1.2. Phytomasse du peuplement

Pour les différents individus échantillonnés, la phytomasse estimée varie de 0,11 à 3077 kg (cf. tableaux annexes p. 195 et 196), la phytomasse moyenne étant de 735 kg par arbre. Cette dernière diffère en fonction de la densité du couvert: alors qu'elle n'est que de 567 kg dans les zones où le pourcentage de recouvrement est faible (23%), elle atteint 1009 kg dans les secteurs où la densité de couvert est la plus forte (76%).

A partir de ces données, nous avons calculé les valeurs de la phytomasse aérienne (exprimées en t/ha) de chacun des 16 relevés, que nous avons mises en relation avec les valeurs du recouvrement (cf. Figure 9).

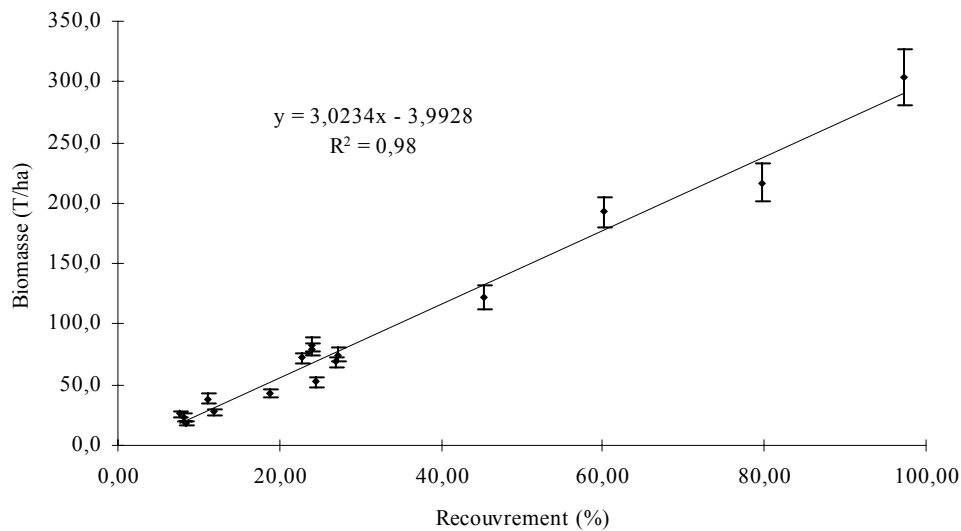


Figure 9: Relation Biomasse / Recouvrement du Thurifère pour les différents relevés

On observe une relation linéaire forte entre le recouvrement et les valeurs de biomasse dans les différents relevés (coefficient de détermination de 0,98), validant de ce fait l'hypothèse de départ selon laquelle le recouvrement et la biomasse sont suffisamment bien corrélés pour permettre d'établir un plan d'échantillonnage pour l'étude de la phytomasse basé sur une carte de la densité du couvert forestier.

On peut noter que les valeurs de recouvrement sont très variables, les secteurs les moins denses présentant un recouvrement de moins de 10% pour une moyenne de 35,8 pieds par hectares, et les secteurs les plus denses un recouvrement proche de 100% pour une moyenne de 206,9 pieds par hectare. A l'échelle du peuplement, le recouvrement moyen est de 19,4%, le nombre moyen de pieds à l'hectare étant de 78,4 ce qui correspond à un milieu très ouvert. La surface moyenne de projection du houppier est de 25 m² par arbre, et la phytomasse moyenne est estimée à 49 t/ha.

Le calcul du rapport entre la somme des projections de houppiers et la surface de chacun des relevés, permet d'attribuer aux quatre zones de densité de couvert définies lors du plan

d'échantillonnage (page 16), un recouvrement moyen du Genévrier thurifère. Ainsi, ce recouvrement a pu être estimé à 10 % dans la zone de densité 1 (classe 3-16 %), 23 % dans la zone de densité 2 (classe 16-26 %), 29 % dans la zone de densité 3 (classe 26-53 %) et 76 % dans la zone de densité 4 (classe 53-100 %). Pour la suite de ce mémoire, nous utiliserons indifféremment le numéro attribué à la zone de densité de couvert (densité 1, 2, 3, et 4), et la valeur correspondante du pourcentage de recouvrement du Thurifère (10%, 23%, 29% et 76 %).

Si l'on étudie la biomasse moyenne de chacune des quatre zones de densité de couvert et non plus la biomasse par relevé, les valeurs que nous obtenons sont les suivantes:

Recouvrement moyen de 10%: 27 t/ha

Recouvrement moyen de 23%: 58 t/ha

Recouvrement moyen de 29%: 67 t/ha

Recouvrement moyen de 76%: 209 t/ha

La faible variation de biomasse lors du passage de la zone de densité 2 à la zone de densité 3 est à mettre en relation avec la faible variation du pourcentage de recouvrement moyen entre ces deux secteurs. En revanche, on peut noter que la zone de plus fort recouvrement présente une phytomasse très nettement supérieure aux autres secteurs.

Les données bibliographiques évoquant la phytomasse des formations arborescentes des milieux semi-arides sont peu nombreuses. Nous avons regroupé dans le Tableau 1 celles concernant des travaux effectués dans des milieux présentant certaines analogies avec le nôtre, dont certaines sur le genre *Juniperus*. Lorsqu'elles étaient disponibles, nous avons noté les valeurs de phytomasse (en t/ha), la densité d'arbres (généralement ne sont pris en compte que les individus sexués ou de diamètre à la base supérieur à 10 cm), ainsi que le pourcentage de recouvrement.

Espèce / Formation végétale	Biomasse (t/ha)	Nbr. Pieds/ha	Recouvrement (%)	Source
-----------------------------	-----------------	---------------	------------------	--------

Station (Pays)				
<i>Juniperus thurifera</i> Oukaïmeden (Maroc)	260	204	54	Badri, 1994
<i>Juniperus thurifera</i> Calatañazor (Espagne)	-	150-200	-	Blanco Castro <i>et al.</i> , 1997
<i>Juniperus thurifera</i> (moyenne sur l'Espagne)	-	15-30	-	Blanco Castro <i>et al.</i> , 1997
<i>Juniperus phoenicea</i> Île de Naxos (Grèce)	29,5	-	46	Tsiourlis, 1992
<i>Juniperus excelsa</i> Sultanat d'Oman	-	24-67	-	Fisher & Gardner, 1995
<i>Juniperus occidentalis</i> Oregon (USA)	20	199	-	Cannell, 1982
<i>Juniperus virginiana</i> Ontario (USA)	-	2445	-	Vasiliauskas & Aarsen, 1992
<i>Argania spinosa</i> Plateau de Haha (Maroc)	52	297	-	Benziane & Khatouri, 1992
<i>Tetraclinis articulata</i> (Maroc)	13,1	-	-	Haloui, 1992
<i>Quercus ilex</i> (Maroc)	43,5	-	-	Haloui, 1992
<i>Quercus ilex</i> Var (France)	65-101	-	-	Miglioretti, 1987
Forêt claire (moyenne à l'échelle mondiale)	20-200	-	-	Lieth, 1975
<i>Juniperus thurifera</i> Azzaden (Maroc)	49	78,4	19,4	Présente étude

Tableau 1: Comparaison bibliographique de données de biomasse

Si l'on s'intéresse dans un premier temps à l'étude menée dans la thuriféraie du Jbel Oukaïmeden par Badri (1994) (située à 12 km à vol d'oiseau de notre site d'étude), on peut noter que ce peuplement apparaît beaucoup plus dense que celui de la vallée de l'Azzaden. Le nombre de pieds par hectare y est 2,6 fois plus important, ce qui se traduit par une phytomasse très élevée pour ce type de milieu, puisqu'elle dépasse de beaucoup la valeur maximale avancée par Lieth (1975) pour ces formations boisées clairsemées (données issues des travaux

de Whittaker, 1970 et Art & Marks, 1971). Il faut cependant souligner que cette thuriféraire bénéficie de conditions climatiques plus favorables qui se manifestent par une pluviosité plus élevée.

Les thuriféraires espagnoles, bien que couvrant des superficies beaucoup plus vastes qu'au Maroc, sont très peu étudiées du point de vue de leur phytomasse. Les quelques données disponibles concernent uniquement les troncs et branches susceptibles d'intéresser le sylviculteur, et sont exprimées en m³. La phytomasse du feuillage n'est par conséquent jamais abordée. Les seules informations que nous pouvons utiliser à titre de comparaison se limitent donc au nombre de pieds par hectare. Dans le peuplement de Calatañazor, la densité d'arbres est très élevée, comprise entre 150 et 200 arbres par hectare. Cette station de genévriers thurifères est considérée de ce point de vue comme étant la plus dense d'Espagne, et l'une des plus dense dans son aire de répartition (Blanco Castro *et al.*, 1997). A l'échelle de la péninsule ibérique, la densité annoncée est par contre beaucoup plus faible (15 à 30 pieds par hectare), et même très inférieure à celle que nous avons trouvée pour la vallée de l'Azzaden, milieu pourtant déjà considéré comme très ouvert. Il faut donc peut être y voir le biais d'une estimation réalisée sur une vaste surface comprenant de grandes étendues où les thurifères n'apparaissent qu'en pieds isolés et non plus en véritable peuplement.

Les données de phytomasse sur le genre *Juniperus* sont trop rares pour ne pas être signalées. Nous avons présenté les résultats obtenus par Tsiourlis (1992) sur un écosystème de maquis dominé par *Juniperus phoenicea*, bien que ces deux milieux soient relativement différents (le maquis étudié par Tsiourlis correspondant à une formation sclérophylle à lentisque, arbousier, olivier sauvage, chêne kermès et genévriers, alors que la thuriféraire de l'Azzaden est un peuplement arboré monospécifique de la haute montagne méditerranéenne).

Les formations à *Juniperus excelsa* Bieb. qui se rencontrent dans le bassin oriental de la Méditerranée, sont en revanche intéressantes à comparer aux thuriféraires car ces deux types de peuplement présentent une physionomie semblable, et se développent à des altitudes similaires (généralement au-dessus de 2000 m). Barbero *et al.* (1994) proposent même de considérer ces deux espèces comme des vicariants écogéographiques et syntaxonomiques méditerranéens respectivement oriental et occidental dérivant d'une hypothétique souche commune. Hélas, nous ne disposons pas de données de phytomasse pour ce milieu, les seules

informations que nous pouvons comparer étant relatives à la densité d'arbres. De ce point de vue, ces deux junipéraies sont d'ailleurs très voisines, bien que la densité moyenne des genévriers thurifères dans notre zone d'étude soit supérieure à la densité maximale enregistrée par Fisher & Gardner (1995) dans le peuplement à *Juniperus excelsa* d'Oman.

Pour la partie nord-américaine, les seules données de phytomasse sur le genre *Juniperus* que nous avons pu recueillir sont celles concernant les peuplements à *Juniperus occidentalis* d'Oregon. Dans ces formations, la phytomasse moyenne est de 20 t/ha, pour une densité de 199 arbres à l'hectare. Dans la thuriféraie de l'Azzaden, une telle densité est atteinte uniquement dans les secteurs les plus denses (207 pieds/ha), mais dans ce cas, la biomasse moyenne est dix fois plus élevée que celle du peuplement à *Juniperus occidentalis* (209 t/ha).

Bien que la physionomie des formations à *Juniperus virginiana* diffère de celles des peuplements à genévriers thurifères, il était néanmoins intéressant de les comparer en terme de densité d'arbres. Vasiliauskas & Aarsen, (1992) rapportent une densité moyenne de 2445 pieds par hectare sans tenir compte des individus asexués, soit environ 30 fois celle observée dans la thuriféraie marocaine. En revanche, on peut penser que la phytomasse n'est pas nécessairement plus forte que celle que nous avons estimée, car bien que certaines caractéristiques dendrométriques de ces arbres soient proches de celles que nous avons enregistrées (hauteur moyenne de 4,6 m, certains individus atteignant 10 m), les diamètres moyens sont beaucoup plus faibles (inférieurs à 20 cm).

Outre les comparaisons effectuées entre genévriers, nous avons voulu comparer les formations à genévriers thurifères avec d'autres formations végétales du bassin méditerranéen. Nous avons donc consigné les valeurs de biomasse relatives à l'arganier (*Argania spinosa*) au chêne vert (*Quercus ilex*) et au thuya (*Tetraclinis articulata*). Au Maroc, hormis les données relativement faibles de la phytomasse du thuya (mesurées il est vrai dans un peuplement âgé de seulement 27 ans), on peut remarquer une certaine homogénéité des valeurs entre les formations à chêne vert, à arganier, et celles à genévriers thurifères. Les données de phytomasse de la chênaie étudiée par Miglioretti (1987) sont elles même assez proches de celles que nous avons obtenues dans notre site d'étude, le seuil des 101 t/ha étant même dépassé dans les secteurs les plus denses de la thuriféraie.

Enfin, si l'on compare les phytomasses obtenues pour ces différentes formations végétales, excepté les valeurs extrêmes de la thuriféraie de l'Oukaïmeden et de la tétraclinaie, on peut remarquer qu'elles sont toutes comprises dans la fourchette établie par Lieth (1975) pour les "forêts claires". S'il est vrai que certains de ces écosystèmes forestiers présentent parfois des phytomasses pouvant atteindre exceptionnellement 200 t/ha, la phytomasse moyenne la plus fréquente se situe autour de 60 t/ha, valeur voisine de celle de la thuriféraie de l'Azzaden.

En ce qui concerne la biomasse des différents compartiments de l'arbre (troncs et branches, rameaux, feuillage et organes reproducteurs) dans les quatre zones de densité de couvert (cf. Tableau 2), on peut noter que les valeurs (exprimées en t/ha) augmentent progressivement des zones de faible recouvrement vers les zones de fort recouvrement, le passage de la zone de densité 3 à la zone de densité 4 étant le plus marqué.

Recouvrement par le Thurifère	Biomasse des rameaux (t/ha)	Biomasse troncs/branches (t/ha)	Biomasse Feuilles (t/ha)	Biomasse des galbules (t/ha)	Biomasse totale (t/ha)
10%	0,57 (0,05)	24,85 (1,5)	1,11 (0,09)	0,07 (0,01)	27 (1,5)
23%	1,23 (0,08)	54,39 (2,3)	2,44 (0,16)	0,11 (0,01)	58 (2,3)
29%	1,58 (0,08)	62,09 (2,3)	3,14 (0,17)	0,17 (0,01)	67 (2,3)
76%	3,85 (0,23)	196,91 (8,2)	7,58 (0,46)	0,45 (0,04)	209 (8,2)
Thuriféraie totale	1,04 (0,07)	45,37 (2,0)	2,07 (0,14)	0,11 (0,01)	49 (2,0)

() écart type

Tableau 2: Biomasse du Genévrier thurifère par compartiments

La proportion relative de ces différents composants pour les quatre zones de densité de couvert, évolue avec l'augmentation du pourcentage de recouvrement (Figure 10). En effet, on note une augmentation du pourcentage du compartiment troncs et branches, qui varie de 75 % (zone de faible recouvrement) à 95 % (zone de fort recouvrement).

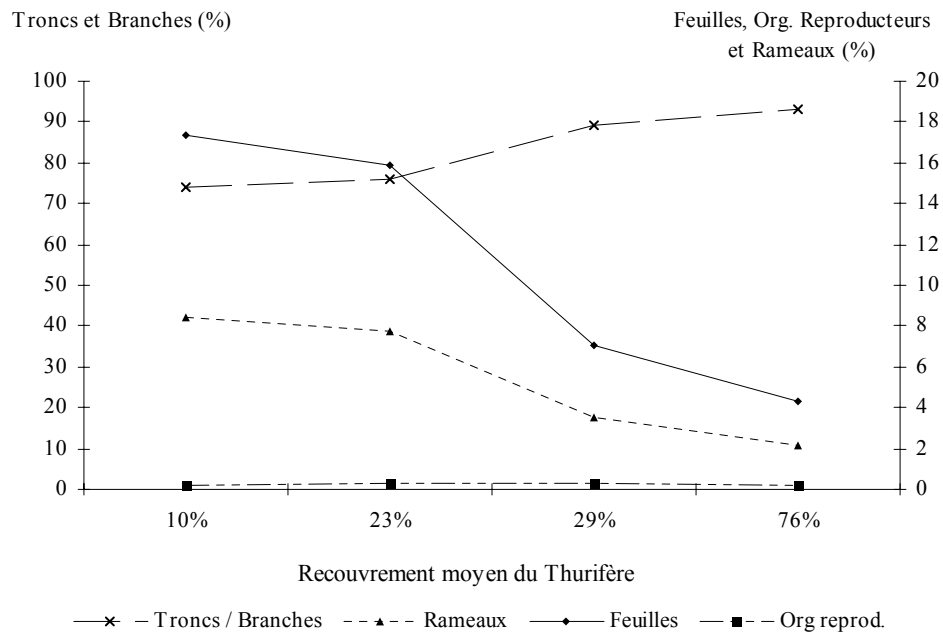
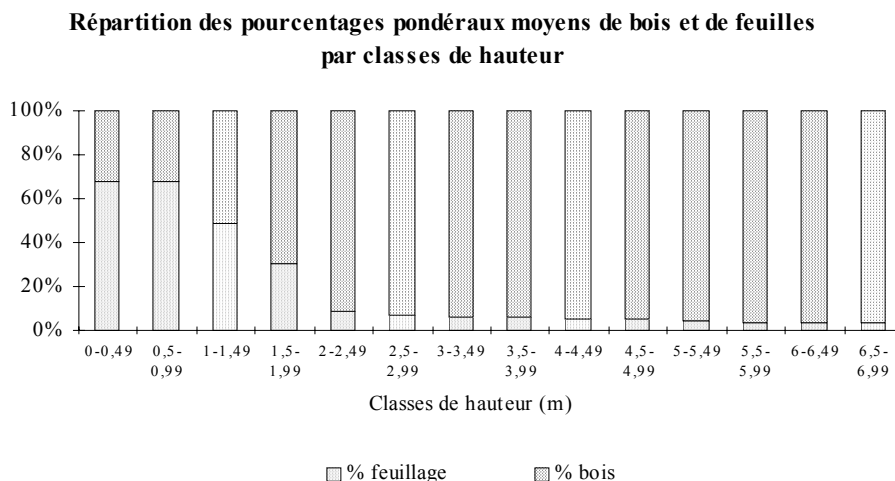


Figure 10: Pourcentage pondéral des différents compartiments de l'arbre

Cette augmentation du pourcentage relatif de la fraction ligneuse peut s'expliquer par l'étude de la phytomasse individuelle moyenne qui se révèle être plus importante dans les secteurs à fort recouvrement (1009 kg/arbre) que dans les zones plus clairsemées (567 à 743 kg/arbre). En effet, l'étude de l'évolution de la proportion relative des organes ligneux et du feuillage à travers différentes classes de hauteur (Figure 11), nous montre que la fraction ligneuse augmente avec la hauteur de l'arbre. Jusqu'à une taille de 1,5 m, le feuillage reste prépondérant, mais au-delà, la fraction ligneuse prédomine jusqu'à représenter plus de 95% de la biomasse totale.

**Figure 11**

Les secteurs à fort recouvrement sont donc non seulement ceux dont le nombre de pieds à l'hectare est maximal, mais également ceux dont la phytomasse moyenne par arbre est la plus élevée et la part relative du tronc et des branches la plus forte.

Il faut cependant souligner que l'architecture des arbres (présentée dans le chapitre "Étude des formes") est un autre paramètre majeur pouvant intervenir sur la proportion des organes ligneux.

A partir de la phytomasse des galbules (cf. Tableau 2), nous avons essayé de préciser les potentialités de régénération sexuée du Thurifère, sachant que le poids moyen d'un galbule de Genévrier thurifère du Maroc (*Juniperus thurifera* L. subsp. *africana*), est estimé (sur un total de 3364 galbules) à 146 mg (Gauquelin *et al.*, 1988), et le nombre moyen de graines par galbules (calculé sur 5225 cônes femelles) estimé à 1,2 (Gauquelin & Lebreton, 1998).

Les résultats sont présentés dans le tableau page suivante (valeurs arrondies au millier):

Recouvrement par le thurifère	Biomasse moyenne des galbules (kg/ha)	Nombre de galbules par hectare	Nombre de graines par hectare	Nombre moyen de graines par arbre
Recouvrement 10%	70	510 000	611 000	44 000
Recouvrement 23%	110	786 000	943 000	22 000
Recouvrement 29%	170	1 170 000	1 404 000	28 000
Recouvrement 76%	450	3 100 000	3 660 000	38 000
Thuriféraie totale	110	746 000	895 000	41 000

Tableau 3: Potentialités de régénération sexuée du Genévrier thurifère

Si l'on compare le nombre moyen de graines par arbre entre les différentes zones de densité de couvert, on peut remarquer une augmentation progressive des zones à faible recouvrement vers les zones à fort recouvrement. La zone de densité la plus faible fait pourtant exception, les arbres y présentant un nombre très élevé de graines. Compte tenu du fait que dans notre zone d'étude, ce secteur correspond à la limite supérieure du peuplement, on peut penser que cette fructification accrue traduit une augmentation des chances à la germination dans un milieu aux conditions écologiques contraignantes.

Les travaux réalisés sur les junipéraies du sud de l'Espagne (années 1985-1989) par Jordano (1993) nous permettent de situer les potentialités de régénération sexuée du Thurifère par rapport à d'autres espèces du genre *Juniperus*. Les résultats sont présentés dans le Tableau 4, dans lequel nous y avons adjoint les données obtenues par Salomonson & Balda (1977) sur *Juniperus monosperma* (Engelm.) Sarg., dans le nord de l'Arizona.

<i>Espèce</i>	Nombre de cônes	Source
Région (Pays)	par hectare	
<i>Juniperus communis</i>		Jordano, 1993
Sierra de Cazorla (Espagne)	200 - 65 800	
Sierra Nevada (Espagne)	1 800 – 469 000	
<i>Juniperus sabina</i>		Jordano, 1993
Sierra de Cazorla (Espagne)	300 – 21 200	
Sierra de Baza (Espagne)	4 600 – 64 200	
<i>Juniperus phoenicea</i>		Jordano, 1993
Sierra de Cazorla (Espagne)	100 – 50 400	
<i>Juniperus monosperma</i>		Salomonson & Balda, 1977
Arizona (USA)	1 000 000 – 27 000 000	
<i>Juniperus thurifera</i>		Présente étude
Azzaden (Maroc)	510 000 – 3 100 000	

Tableau 4 Exemples de potentialités de régénération sexuée de quelques genévriers

Il ressort clairement de cette comparaison que la fructification du Genévrier thurifère est bien supérieure à celle enregistrée dans les junipérais espagnols. En effet, même la fructification du Genévrier commun, pourtant la plus importante des trois espèces étudiées, n'atteint pas la plus faible valeur enregistrée à l'Azzaden. En outre, si l'on compare le Genévrier thurifère au Genévrier de phoenicie qui est l'espèce la plus proche du point de vue des caractères morphométriques des galbules, on peut remarquer que non seulement la fructification de cette espèce est plus faible que celle du Thurifère, mais qu'elle est également plus faible que celle des autres espèces du genre *Juniperus*.

Pourtant, quatre facteurs au moins semblent défavorables à une fructification abondante des genévriers thurifères dans le site étudié:

- la forte dégradation du houppier des arbres par le pâturage intensif et son utilisation comme fourrage pour le bétail.
- le faible nombre de pieds à l'hectare (78,4)
- la grande longévité de cette essence qui ne justifierai pas une fructification aussi abondante que celle d'espèces à durée de vie plus courte.
- les conditions climatiques et édaphiques particulièrement contraignantes

Sans doute faut-il donc y voir la stratégie adaptative d'une espèce longévive capable de coloniser ces milieux méditerranéens semi-arides d'altitude, dans lesquels les germinations sont rares et la survie des jeunes plants grandement compromise par les facteurs environnementaux.

Comparée au Thurifère, la fructification de *Juniperus monosperma* apparaît plus importante, mais il convient de pondérer ces résultats en tenant compte du fait que ces junipéraies nord-américaines sont généralement beaucoup plus denses que celles du Maroc, et que les cônes femelles de cette espèce ne présentent qu'une seule graine.

2.2.1.3. Conclusion

Les résultats de l'étude de la phytomasse de ce peuplement à genévriers thurifères permettent de tirer des conclusions quant à la validité du plan d'échantillonnage que nous avons choisi. En effet, la relation linéaire liant le pourcentage de recouvrement à la phytomasse des différents relevés, vient confirmer la pertinence du choix d'un échantillonnage stratifié basé sur une cartographie préalable de la densité du couvert.

La couverture arborée présente de grandes inégalités: variant de 10% à près de 100%, le recouvrement moyen du Thurifère est estimé à environ 20%, ce qui caractérise un milieu très ouvert, dont la densité d'arbres est d'environ 78 pieds par hectare. Il s'ensuit de fortes variations dans les valeurs de phytomasse moyenne (27 à 209 t/ha), cette dernière étant estimée pour l'ensemble de la thuriféraie à environ 49 t/ha. En dépit d'une faible densité d'arbres à l'hectare, cette phytomasse n'en est pas moins relativement élevée comparée à celle obtenue par d'autres auteurs sur des forêts méditerranéennes beaucoup plus fermées. En outre, cette biomasse apparaît d'autant plus importante que ce peuplement est soumis à l'exploitation intensive de la réserve ligneuse par les villageois, et se développe dans les conditions climatiques très contraignantes de la haute montagne méditerranéenne.

La phytomasse des organes reproducteurs est elle-même relativement élevée, surtout si l'on tient compte du fait que c'est une espèce longévive, avec une faible densité de pieds à l'hectare, et dont le houppier des arbres, porteur des cônes femelles est souvent très dégradé. Bien que cette espèce présente de très bonnes potentialités germinatives, on constate cependant de graves problèmes de régénération qui seront abordés dans le chapitre " Les caractéristiques dendrométriques et le sex-ratio de la population".

RÉSUMÉ

La phytomasse du peuplement

- ✓ Phytomasse moyenne par arbre: 735 kg
- ✓ Recouvrement moyen: 19,4%
- ✓ Densité moyenne: 78,4 pieds / ha
- ✓ Surface moyenne de projection du houppier: 25 m²
- ✓ Phytomasse moyenne:
 - ① rameaux: 1,04 t/ha
 - ① Troncs – branches: 45 t/ha
 - ① Feuillage: 2,07 t/ha
 - ① Galbules: 0,11 t/ha
 - ① Total: 49 t/ha
- ✓ Nombre moyen de galbules par hectare: 746 056
- ✓ Nombre moyen de graines par arbre: 41 107

2.2.2. La productivité du Thurifère

2.2.2.1. Densités apparentes des cernes

Les densités apparentes des cernes pour les différents types de pixels sont résumées dans le Tableau 5. Pour les pixels B et H, la densité apparente correspond à la densité réelle du bois, tandis que pour les pixels M et F, elle correspond au poids du cerne annuel produit dans un volume défini.

Pixels	Densité apparente (kg/m ³) $\pm \sigma$
B et H	614,70 $\pm$ 38,90
F	1,15 $\pm$ 0,65
M	0,79 $\pm$ 0,11
σ = écart type	

Tableau 5: Valeurs de densité apparente du cerne annuel pour les différents pixels

2.2.2.2. Productivité ligneuse

La productivité ligneuse du Thurifère s'élève à 2,2 t/ha/an, avec des différences importantes suivant l'importance du recouvrement (Tableau 6). La productivité la plus faible, enregistrée dans le secteur le plus clairsemé, est en effet près de sept fois moins importante que celle de la zone de densité maximale.

	Superficie (ha)	Biomasse moyenne (t/ha)	Productivité ligneuse moyenne (t/ha/an)
Recouvrement par le Thurifère: 10%	819	27	1,5
Recouvrement par le Thurifère: 23%	1088	58	2,4
Recouvrement par le Thurifère: 29%	260	67	3,1
Recouvrement par le Thurifère: 76%	17	209	10,5
Thuriféraie totale	2184	49	2,2

Tableau 6: Productivité ligneuse moyenne du Genévrier thurifère

La comparaison de ces résultats avec d'autres écosystèmes forestiers, nous permet de mesurer toute l'importance de la productivité de cette formation arborée. Dans le Tableau 7, nous avons fait figurer les productivités ligneuses de forêts sclérophylles méditerranéennes, ainsi que celles de formations boisées non méditerranéennes (hêtraie et pessière par exemple), afin de positionner la Thuriféraie étudiée à la fois par rapport à d'autres écosystèmes de milieux semi-arides, mais aussi par rapport à des écosystèmes forestiers de forte productivité. Compte tenu de l'hétérogénéité des unités employées dans les différentes sources bibliographiques, nous avons présenté nos données de productivité à la fois en t/ha/an et en m³/ha/an.

Espèce / Formation végétale	Productivité ligneuse (t/ha/an)	Productivité ligneuse (m ³ /ha/an)	Source
<i>Quercus ilex</i> (France)	2,2		Cannell, 1982
<i>Quercus robur</i> (France)	2,7		Cannell, 1982
<i>Juniperus occidentalis</i> (Oregon, USA)	0,3		Cannell, 1982
<i>Tetraclinis articulata</i> (Maroc)	0,4		Haloui, 1992
<i>Quercus ilex</i> (Maroc)	1,2		Haloui, 1992
<i>Castanea sativa</i> (Italie)	2,4 – 5,4		Leonardi <i>et al.</i> , 1996
<i>Fagus sylvatica</i> (Suède)	11,0		Nihlgard, 1972
<i>Picea abies</i> (Suède)	10,3		Nihlgard, 1972
Forêt claire	2 – 10*		Lieth, 1975
<i>Cedrus atlantica</i> (Maroc)		4,0 - 9,0	Barrouch & Keller, 1994
<i>Quercus ilex</i> (France)		3,2 – 3,8	Miglioretti, 1987
<i>Juniperus thurifera</i> (Espagne)		0,2	Lucas Santolaya, 1998
<i>Juniperus thurifera</i> (Maroc)	2,2	3,6	Présente étude

* Productivité primaire nette (t/ha/an)

Tableau 7: Données bibliographiques de productivité ligneuse d'écosystèmes forestiers

Comparée aux formations arborées se développant sous climat méditerranéen, la Thuriféraie de l'Azzaden présente une productivité ligneuse élevée. En France, les taillis de chêne vert ont une productivité sensiblement identique à celle du Thurifère, mais les écosystèmes arborés marocains (chênaie et tétraclinaie) montrent quant à eux une productivité ligneuse inférieure. De même, que ce soit pour les formations à genévriers thurifères d'Espagne ou encore celles à

Juniperus occidentalis de l'Oregon, la productivité est très faible (0,2 et 0,3 t/ha/an), bien que les individus d'un diamètre inférieur à 10 cm n'aient pas été pris en compte. Présentant une productivité comparable à celle de peuplements très différents tels ceux à *Quercus robur* ou *Castanea sativa*, la Thuriféraie de l'Azzaden montre en revanche des valeurs naturellement plus faibles que celles de la cédraie marocaine, ou de la hêtraie et de la pessière suédoise. Néanmoins, ces différences sont à relativiser car la cédraie prise en exemple est une forêt de production et non un écosystème naturel. De plus, bien que localisée sur une surface très réduite (17 ha), la Thuriféraie est capable d'atteindre une productivité maximale de plus de 10 t/ha, valeur voisine de celles obtenues par Nihlgard (1972) et Barrouch & Keller (1994) sur les écosystèmes forestiers précédemment cités.

En outre, la productivité moyenne de la Thuriféraie se situe dans l'intervalle des valeurs citées par Lieth (2 – 10 t/ha/an), et même si cette valeur est proche de la borne inférieure, il faut rappeler que les valeurs annoncées par ces auteurs sont celles de la productivité primaire de tout un écosystème, alors que celle de la Thuriféraie ne concernent que la fraction ligneuse du Genévrier thurifère.

Ramené à l'individu, le taux d'accroissement en biomasse des organes ligneux est de 4,8%, ce qui représente pour un individu moyen d'environ 600 kg, une productivité de près de 30 kg/an. Le même calcul effectué sur *Picea abies* ou *Fagus sylvatica* dans les peuplements précédemment évoqués, donne une productivité respective de 15 kg et 62 kg par arbre, révélant que la forte productivité de ces peuplements réside surtout dans les fortes densités d'arbres à l'hectare.

Ces résultats mettent donc en évidence la forte productivité de cette essence, en dépit d'un climat rigoureux, d'un sol très superficiel, d'un recouvrement réduit, d'un accroissement radial annuel relativement faible (1 mm), et de la dégradation anthropique (mutilation des arbres et prélèvements de bois) dont l'impact sur la productivité globale du peuplement est direct. Cette productivité élevée est sans doute à mettre en relation d'une part avec l'importance des surfaces terrières de ces formations à genévriers thurifères, estimées par Gauquelin *et al.* (1992) à près de 75 m²/ha, mais surtout avec l'architecture "pluri-caulinaire" des arbres. En effet, à surface terrière égale et à accroissement annuel identique, la productivité augmenterait avec le nombre de tiges (selon des études dendroécologiques en cours, les éventuelles

compétitions "inter-caulinaire" n'affectant pas l'accroissement moyen (Bertaudière, communication personnelle)).

Pour illustrer l'avantage de l'architecture pluri-caulinaire, prenons l'exemple suivant: si l'on considère 4 individus de surface terrière identique (1 m^2) et d'accroissement radial annuel égal (1 mm), présentant respectivement 1, 2, 3, et 4 troncs, la surface totale du cerne produit annuellement est la suivante:

1 tronc: $3,54.10^{-3} \text{ m}^2$

2 troncs: $5,01.10^{-3} \text{ m}^2$

3 troncs: $6,13.10^{-3} \text{ m}^2$

4 troncs: $7,08.10^{-3} \text{ m}^2$

Pour une même surface terrière, la productivité de l'arbre à tronc unique est donc deux fois plus faible que celle de l'arbre à 4 troncs.

Par conséquent, l'incroyable vitalité de ces écosystèmes à genévriers thurifères, réside peut être à la fois dans la taille parfois exceptionnelle des arbres, mais également dans leur aptitude à développer de nombreux troncs (3 à 4 tiges par arbre en moyenne), puisqu'en terme de productivité, à surface terrière égale, la stratégie "troncs multiples" s'avère plus avantageuse que la stratégie "tronc unique". Comme nous le verrons dans le chapitre "Caractéristiques morphologiques des genévriers thurifères" (p.77), le développement de troncs multiples semble lié à la faible dominance du bourgeon apical (Fritts, 1976), issue de la mutilation de la tige principale des arbres, et/ou de l'influence de facteurs endogènes, permettant ainsi à cette espèce de maintenir une productivité ligneuse élevée en dépit des fortes contraintes environnementales qui caractérisent ces écosystèmes arborés de la haute montagne méditerranéenne (conditions climatiques, dégradation anthropique, etc.).

2.2.3. Les caractéristiques dendrométriques et le sex-ratio de la population

Afin de tester la fiabilité de la méthode concernant le calcul de la hauteur des arbres, nous avons comparé les valeurs estimées avec les hauteurs mesurées sur le terrain (cf. Figure 12).

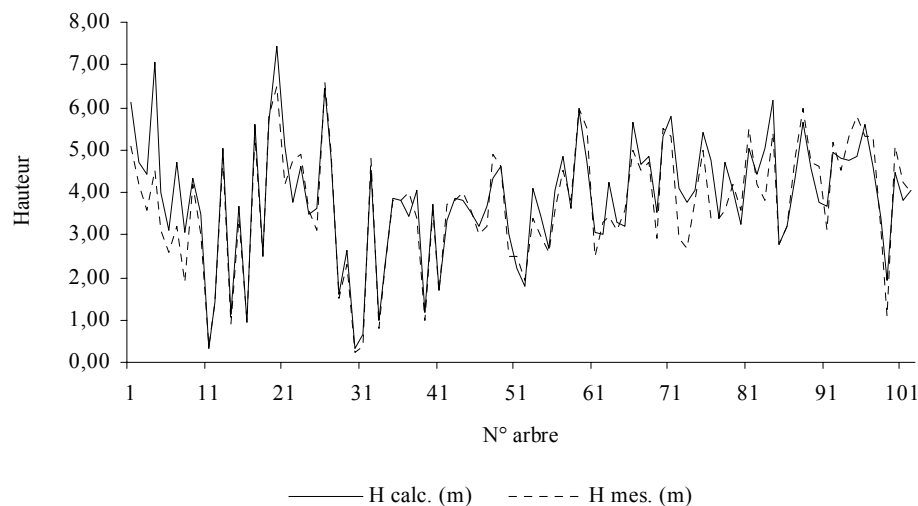


Figure 12: Relation hauteur calculée / hauteur mesurée

Il ressort de cette comparaison une relativement bonne coïncidence des deux courbes. Cependant, il est à noter que trois hauteurs sont particulièrement surestimées, dépassant 60% de la valeur mesurée, mais elles correspondent à seulement trois individus de taille très réduite, de 40 cm à moins de 2 m, dont le "poids statistique" est faible.

Sur l'ensemble de l'échantillonnage, l'erreur moyenne est de 14%, valeur acceptable, compte tenu du fait que ces deux méthodes sont radicalement différentes, on été réalisées à des distances différentes et que cette erreur peut aussi être partiellement imputée à l'utilisateur du dendromètre.

Dans une certaine mesure, ces résultats constituent donc un début de validation de la méthode employée, au moins en ce qui concerne les premières étapes: acquisition des photos, codage des arbres et calcul de l'échelle.

Néanmoins, possédant les hauteurs mesurées sur le terrain, ce sont ces dernières que nous utiliserons pour la suite de cette étude.

Sur l'ensemble des arbres échantillonnés, la hauteur moyenne est de 3,7 m, valeur relativement faible pour cette espèce. A titre de comparaison, la hauteur moyenne des

genévriers thurifères la station de l'Oukaïmeden est de 7,5 m (Badri, 1994). Cette importante différence, du simple au double, peut être mise en relation avec deux facteurs essentiels à la croissance de cet arbre et qui s'expriment de manière très différente dans ces deux stations: les conditions climatiques et l'intensité de la dégradation.

Les conditions climatiques semblent en effet moins favorables au Genévrier thurifère dans la vallée de l'Azzaden, comme déjà évoqué au niveau de la densité de couvert. Bien que ces deux stations soient relativement proches (14 km à vol d'oiseau), la station de l'Oukaïmeden, légèrement plus au nord, est située en bordure de la chaîne, face à la plaine du Haouz, et bénéficie ainsi de l'apport de masses d'air humides (Peyre, 1983); au contraire, dans la vallée de l'Azzaden, située en position semi-interne et donc abritée des vents pluvieux, la sécheresse est plus accentuée (Alifriqui *et al.*, 1995).

Concernant la dégradation anthropique, aucune étude comparative n'a encore été menée pour quantifier ce phénomène, mais les nombreuses observations que nous avons réalisées sur le terrain (proportion de souches dans le peuplement, état sanitaire des arbres, nombre de troupeaux de caprins, proximité, importance et nombre de villages, vallée isolée) nous conduisent à penser que ce problème se manifeste avec plus d'intensité dans la vallée de l'Azzaden.

Cette hypothèse est de plus renforcée par la distribution des arbres dans les différentes classes de hauteur, qui ne suit pas une courbe de Gauss, caractéristique des peuplements en équilibre (cf. Figure 13).

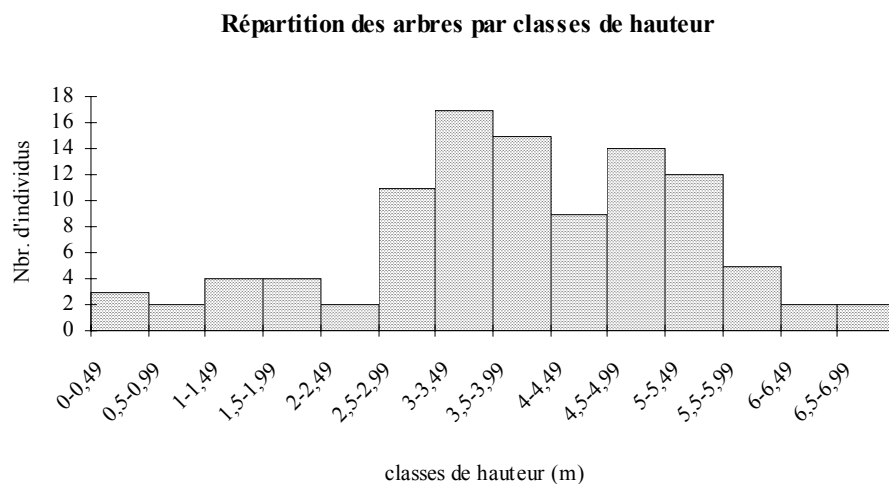


Figure 13

Les classes de hauteur inférieures à 2,5 m sont sous représentées et les classes médianes sont affectées par certains déséquilibres, notamment la classe 4-4,5 m.

Le faible effectif des arbres inférieurs à 2,5 m peut s'expliquer par des problèmes de régénération naturelle du peuplement lié au faible taux de germination constaté (on peut écarter l'hypothèse d'une dégradation plus importante sur les petits individus car la pression anthropique ne semble pas être sélective).

Si cette hypothèse était confirmée, connaître l'âge des arbres de la classe 2-2,5 m pourrait permettre de déterminer la date à laquelle a commencé à se poser le problème de la germination dans le milieu, en tenant compte du fait que les arbres de cette taille puissent avoir des âges différents

Bien qu'il soit encore difficile de préciser les causes de ce déficit germinatif, il semblerait que le décapage des horizons superficiels du sol lors de phénomènes érosifs intenses, joue un rôle prépondérant. En effet, dans les peuplements voisins, les rares germinations ont été observées exclusivement sous la couronne des arbres, où se développe un véritable horizon humifère, mettant en évidence l'importance du microédaphisme sur la dynamique de régénération du peuplement (Gauquelin & Dagnac, 1988; Gauquelin *et al.*, 1998a). Ce rôle de protection des jeunes individus par le houppier des arbres adultes en zone aride et semi-aride a également été observé dans les junipéraies à *Juniperus excelsa* de l'Arabie Saoudite (Fisher & Gardner, 1995) et du Pakistan (Ahmed *et al.*, 1990). Cependant, dans la vallée de l'Azzaden, nous n'avons pratiquement pas observé de germinations sous le couvert des arbres, probablement dû au fait que:

- dans ce milieu plus dégradé, les processus érosifs même atténués par l'influence de la couronne, sont plus intenses, en liaison aussi avec la nature schisteuse du substrat.
- le pâturage, activité très développée dans cette vallée, élimine très tôt les plantules issues des rares germinations.

En revanche, nous avons pu fréquemment constater la présence de jeunes individus ayant pris racines au sein même des touffes de xérophytes épineuses (phénomène également constaté par Lemoine-Sébastien, 1965), profitant probablement à la fois:

- de la protection de la plante contre le pâturage et l'érosion du sol (les nombreuses pierres en mouvement susceptibles de faire disparaître d'éventuelles germinations sont retenues en amont de la touffe).

- de la présence d'un substrat enrichi en éléments minéraux, à l'image du microédaphisme régnant sous la couronne des genévriers (Gauquelin, 1982; Gauquelin, 1988; Gauquelin *et al.*, 1998a).
- d'une protection contre les facteurs climatiques extrêmes tels que les basses températures hivernales, ou encore la sécheresse et l'insolation estivale. Sur ce point, des travaux effectués par Quézel (1967) sur le même type formation d'altitude révélaient des températures au sol de 35°C (mois de juillet, à 14h environ) contre seulement 18° à l'intérieur d'une touffe de xérophyte épineuse. De même, l'humidité relative était de 70 à 80% au sein de la touffe alors qu'elle était inférieure à 30% à l'extérieur de celle-ci. Les conditions particulières régnant dans ce type de microhabitats ont également été mises en évidence dans les milieux semi-arides d'Amérique du Nord (Johnsen, 1962; Burkhardt & Tisdale, 1976; Vetaas, 1992; Chambers *et al.*, 1999)

Cependant, le décapage des horizons superficiels du sol et le pâturage n'expliquent pas à eux seuls les problèmes de germination. En effet, certains auteurs ont constaté dans plusieurs peuplements à genévriers thurifères du Maroc que le taux de parasitisme des graines et des galbules est très élevé, et les ravageurs très variés (Bigot, 1989; El Alaoui El Fels, 1991). On y trouve des arachnides et de nombreux insectes (Coléoptères, Hyménoptères, et Diptères principalement). Dans le peuplement de l'Oukaïmeden, une étude (menée sur 8000 galbules) a révélé que près de 90% des graines étaient parasitées (Badri, 1994). En comparaison, un taux de parasitisme de 64,5% sur des galbules de *Juniperus excelsa* en Arabie Saoudite a été enregistré par Hajar *et al.* (1991) et considéré comme principal responsable des problèmes de régénération du peuplement, bien que cette hypothèse soit contestée par certains auteurs (Gardner & Fisher, 1994).

De plus, des essais de germination réalisés en laboratoire sur des graines saines (1200 graines) sur lesquelles plusieurs traitements ont été testés (stratification, hormones, scarification, eau oxygénée) ont donné un taux de réussite inférieur à 5% (Badri, 1994).

Ces problèmes de régénération naturelle se rencontre aussi dans d'autres junipéraies, telles celles à *Juniperus excelsa* du Pakistan (Ahmed *et al.*, 1990; Ciesla *et al.* 1998), celles à *Juniperus indica* des montagnes du Karakorum (Esper, 1994), mais également dans la plupart des thuriféraies marocaines (Boudy & Emberger, 1934; Emberger, 1938 & 1939; Fromard & Gauquelin, 1993; Badri *et al.*, 1994; Gauquelin *et al.*, 1999). La responsabilité du parasitisme dans ce milieu reste donc à définir afin d'en préciser l'impact sur la régénération. Enfin, il ne

faut écarter ni l'effet éventuel du climat, Sebastian en 1958 notant que les graines semblent présenter une double dormance dont la levée nécessite une période froide, ni le rôle des endomycorhizes, très peu étudié sur cette espèce (Boullard, 1986), et dont l'influence sur les processus de germination est peut être décisive (Borel & Polidori, 1983).

Si l'on classe maintenant les arbres en deux catégories, les individus sexués et les individus asexués, et que l'on s'intéresse à leur répartition dans les différentes classes de hauteur pour les différentes zones de densité (cf. Figure 14), on peut tout d'abord remarquer que les individus sexués ont une taille minimale de 1,5 m. A titre de comparaison, dans les thuriferaies des Alpes françaises, les individus fertiles, âgés de 40 à 50 ans (Borel & Polidori, 1983), mesurent au minimum 3 m. Si la maturité sexuelle est acquise au même âge dans ces deux populations, cela signifie qu'un thurifère de 1,5 m dans la vallée de l'Azzaden a le même âge qu'un thurifère de 3 m dans les Alpes, soit 40 à 50 ans. Compte tenu du pâturage intensif qui limite très fortement la croissance apicale des genévriers dans cette vallée, cette hypothèse est vraisemblable. De plus, nous avons rencontré des arbres atteignant à peine 25 cm de hauteur pour un diamètre basal de 4,5 cm. Si l'on applique l'accroissement radial calculé sur ces arbres dans le peuplement de l'Oukaïmeden soit 1,4 mm/an (Bertaudière, 1999), cela signifie qu'un individu de 25 cm peut être âgé de plus de 15 ans.

Certes, les populations françaises et marocaines correspondent à deux sous espèces différentes (var. *Juniperus thurifera* L. subsp. *africana* pour les populations d'Afrique du Nord et *Juniperus thurifera* L. subsp. *thurifera* chimiovar *gallica* pour les populations alpines), et dans un milieu plus défavorable comme celui du Maroc, l'acquisition de la maturité sexuelle est peut être plus précoce.

Les individus asexués sont des arbres de petite taille, ne se retrouvant pas dans les même classes de hauteur que les individus sexués (excepté dans la zone de densité 3). On peut donc penser qu'ils sont effectivement immatures et qu'ils ne correspondent pas à des arbres sexuellement développés mais n'ayant pas encore de cônes au moment de l'échantillonnage. Le pourcentage moyen d'asexués pour le peuplement est de 11,8%, ce qui est très modeste en comparaison de peuplements français tel que celui des Pyrénées pour lequel il a été trouvé un pourcentage d'asexués de 72%. Des travaux portant sur *Juniperus communis* (Falinski, 1980) ont montré que la proportion d'asexués pouvait renseigner sur la dynamique du peuplement. Il en est ressorti que dans les phases de colonisation, le pourcentage d'asexués varie autour de 87% , alors que pendant les phases de stabilisation, il varie de 67 à 30% (respectivement pour

le début et la fin de la phase de stabilisation). Avec un pourcentage d'asexués de moins de 12% soit une moyenne de 9,4 asexués par hectare, la thuriféraie de l'Azzaden ne se situe dans aucune de ces deux alternatives, mais probablement dans une phase de dynamique régressive. La sous représentativité des asexués n'est pas homogène sur tout le peuplement. La comparaison des différentes zones de densité nous révèle que les jeunes arbres se rencontrent en plus grande proportion dans les zones les plus clairsemées (respectivement 29%, 16%, 12% et 4% pour les zones de densité croissantes 1, 2, 3, et 4). Ainsi, paradoxalement, la représentativité des jeunes individus est inversement proportionnelle à la densité du couvert. Mais ce paradoxe n'est qu'apparent. Cette constatation vient au contraire appuyer nos précédentes observations selon lesquelles nous n'avons pas rencontré de jeunes genévriers sous la couronne des arbres, mais principalement au sein des touffes de xérophytes. En effet, les xérophytes elles non plus, ne se rencontrent que rarement sous la couronne des arbres (Quézel, 1957), comme nous le verrons dans le chapitre "Évaluation de la phytomasse des xérophytes", page 94. Ainsi, plus le recouvrement des thurifères est faible, plus la surface colonisable par les xérophytes est importante et plus le nombre de jeunes individus augmente. Le cas le plus extrême est celui de la zone de plus faible densité, située à la limite supérieure de la thuriféraie, correspondant à la zone de transition Thuriféraie-Xérophytaie (Photo n° 5). Néanmoins dans ce secteur, le fait d'observer de jeunes individus peut aussi s'expliquer par une dégradation moins intense dû au plus fort éloignement des villages. Il semblerait donc que ces plantes en coussinet jouent un rôle majeur dans la régénération du peuplement, atténuant dans une certaine mesure l'effet de la dégradation du couvert arboré.



Photo n° 5: Limite supérieure de la Thuriféraie

Mais ce rôle tampon tendrait à s'amenuiser, car la dégradation menace également les xérophytes épineuses, servant de combustible d'appoint, notamment dans les secteurs peu denses en genévriers thurifères ou au voisinage des villages (la collecte de bois étant interdite). La distribution des arbres dans les différentes classes de hauteur a, dans un second temps, été étudiée par zone de densité.

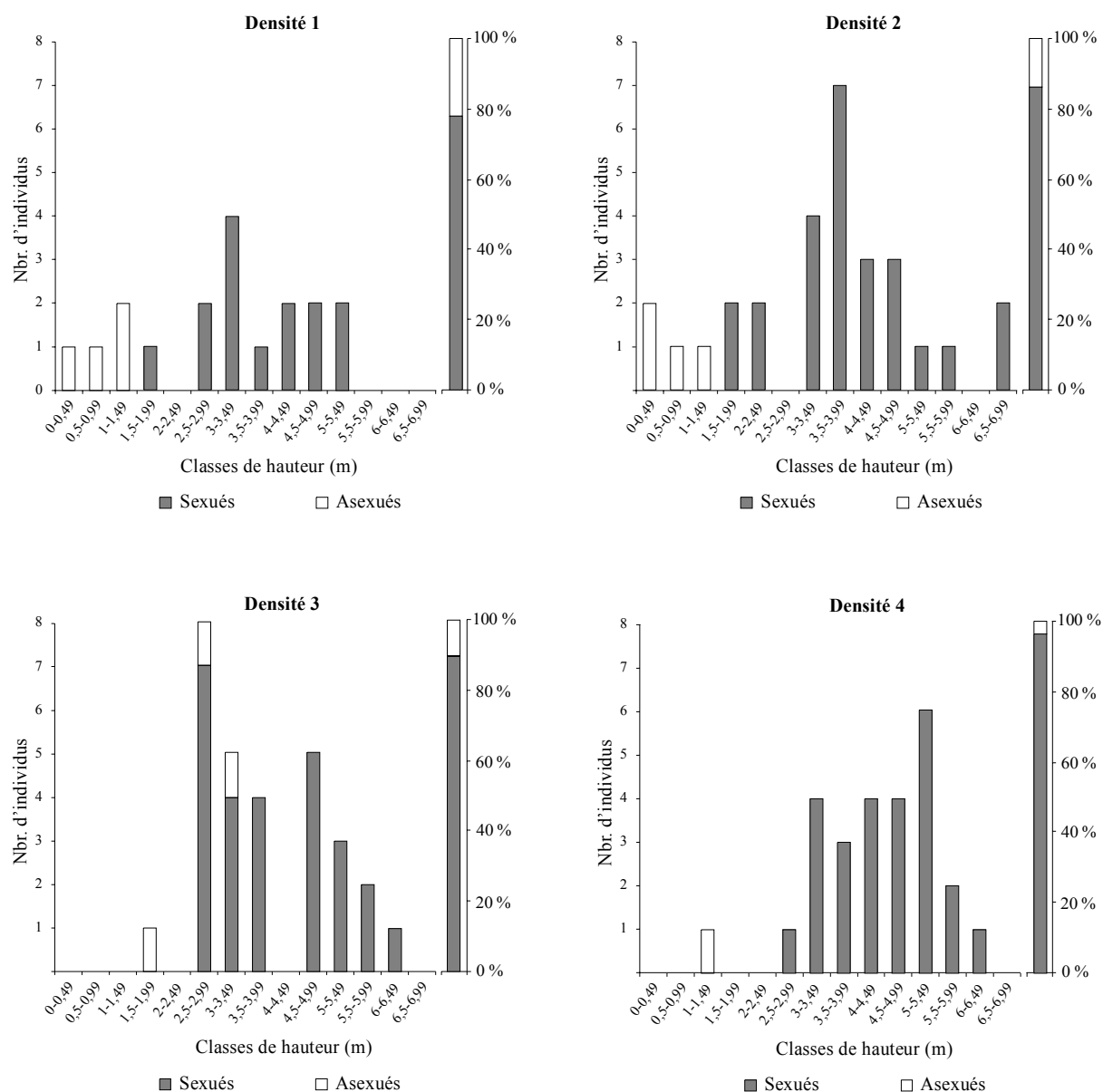


Figure 14: Distribution des arbres par classes de hauteur en fonction de la densité de couvert

Dans la zone de faible densité, on observe une grande homogénéité entre les différentes classes de hauteur. Une seule classe domine: celle des individus compris entre 3 et 3,5 m. Les arbres sont de taille modeste (on ne trouve pas d'arbres supérieurs à 5,5 m), la hauteur moyenne étant de 3,1 m. La faible croissance apicale des genévriers dans ce secteur est très certainement sous l'influence des conditions écologiques plus sévères régnant à la limite supérieure du peuplement (environ 2300 m dans la zone d'étude). Tranquillini (1979) estime sur un peuplement de *Picea abies* une réduction de la croissance annuelle apicale de 2 cm par incrément de 100 m d'altitude. Cette influence de l'altitude a par ailleurs été mise en évidence sur la croissance radiale du Genévrier thurifère dans un peuplement voisin (Bertaudière, 1999).

Les arbres sont tous morphologiquement similaires, le tronc masqué par un houppier descendant jusqu'au sol, et adoptent donc un port plus ou moins prostré caractéristique des plantes en coussinet. Sur cette figure, on peut également remarquer qu'on ne trouve pas d'individus sexuellement matures d'une hauteur inférieure à 1,5 m.

Dans la zone de densité 2, la hauteur moyenne des arbres est de 3,4 m, avec une hauteur maximale de 7 m, ce qui est aussi la hauteur maximale enregistrée parmi les 102 arbres échantillonnés. La représentativité des différentes classes de hauteur correspond presque à celle d'un peuplement en équilibre, avec toutefois quelques irrégularités (deux classes de hauteur manquent). Comme précédemment, nous n'avons pas rencontré d'arbres sexués d'une hauteur inférieure à 1,5 m.

Dans la zone de densité 3, on remarque de fortes perturbations dans la représentativité des différentes classes de hauteur. La hauteur moyenne des arbres dans ce secteur est de 3,8 m, la hauteur maximale étant de 6,5 m.

Nous pouvons noter l'absence d'individus sexués d'une hauteur inférieure à 2,5 m, mais en revanche certains individus de sexe indéterminé atteignent une hauteur de 3 à 3,5 m.

Dans la zone de plus forte densité, la courbe de Gauss est décalée vers la droite donc vers les arbres les plus grands. Comme précédemment, on peut noter l'absence quasi totale d'arbres sexués d'une hauteur inférieure à 2,5 m. La hauteur moyenne y est de ce fait la plus élevée, et atteint 4,3 m, la hauteur maximale étant de 6,5 m.

d'autres espèces du genre *Juniperus* comme *Juniperus virginiana* (Van Haverbeke & Read, 1976) et *Juniperus communis* (Falinski, 1980; Ward, 1982).

Les sex-ratio de la classe de hauteur 1,5-1,99 m (100% de mâles) et 2-2,49 m (100% de femelles) ne sont pas significatifs car le nombre d'arbres intervenant dans le calcul est insuffisant (respectivement 3 et 2 individus).

Pour les mêmes raisons, il n'est pas possible de conclure à un effet éventuel de l'altitude sur le sex-ratio, bien que l'on puisse noter (hormis pour les altitudes extrêmes) la prépondérance des individus femelles aux altitudes moyennes, et des individus mâles aux altitudes inférieures et supérieures du peuplement, (Figure 16). Un échantillonnage plus important permettrait peut-être d'obtenir des différences significatives comme cela a été fait pour d'autres taxons (Grant & Mitton, 1979).

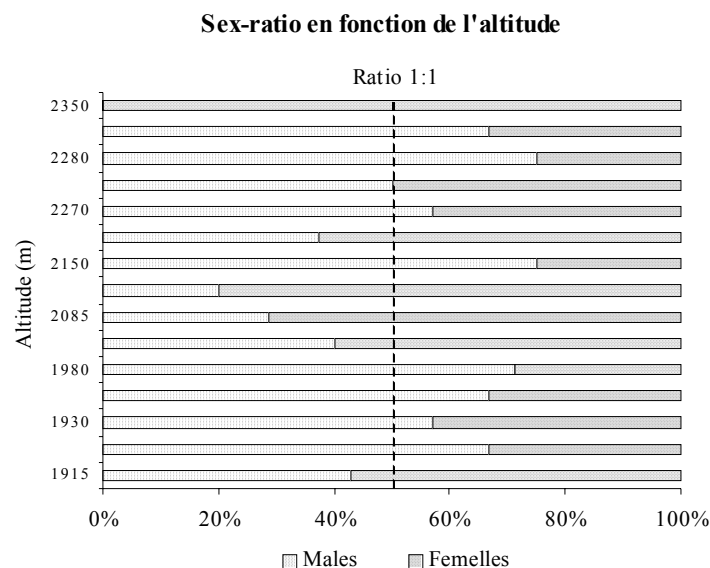
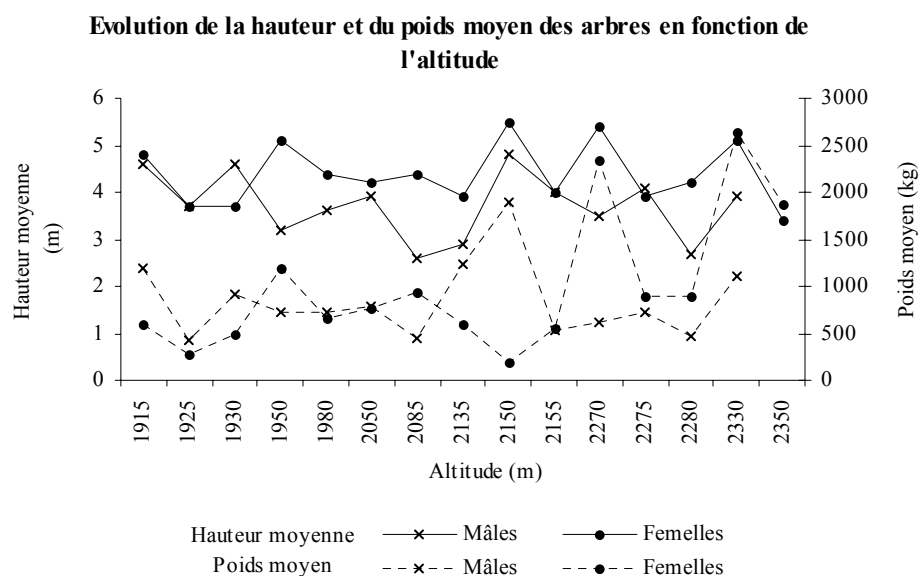


Figure 16

En revanche, on retrouve l'effet de l'altitude sur la croissance, évoqué plus haut (Figure 17). En effet, aux altitudes les plus élevées, le poids moyen des femelles est plus important que celui des mâles.

En ce qui concerne la hauteur moyenne, cette prédominance, même légère, des femelles s'observe à pratiquement toutes les altitudes (ce que nous avons déjà entrevu dans la Figure 15), permettant d'écarter l'hypothèse d'une plus grande compétitivité des mâles, notamment dans des conditions écologiques limitantes.

**Figure 17**

Ainsi, contrairement à ce qui a été observé chez d'autres espèces dioïques comme *Juniperus communis* (Falinski, 1980; Ward, 1982), *Juniperus excelsa* subsp. *polycarpus* (Fisher & Gardner, 1995) ou *Juniperus virginiana* (Vasiliauskas & Aarssen, 1992), la mobilisation énergétique nécessaire à la production des galbules ne semble donc avoir une influence négative sensible ni sur la croissance en hauteur des pieds femelles, ni sur le sex-ratio.

Cet équilibre entre mâles et femelles tant au niveau du sex-ratio que du poids moyen, se retrouve dans l'échantillon total. Sur les 102 arbres échantillonnés dans les 16 placettes, nous avons dénombré au total 45 femelles, 45 mâles et 12 individus dont le sexe n'a pu être déterminé. Le sex-ratio de la population totale est donc remarquablement équilibré (1/1), de même que dans chacune des quatre zones de densité prospectées (Figure 18), avec une variation de 1 mâle pour 1,16 femelle (zone de densité 3), à 1 mâle pour 0,92 femelle (zone de densité 2 et 4).

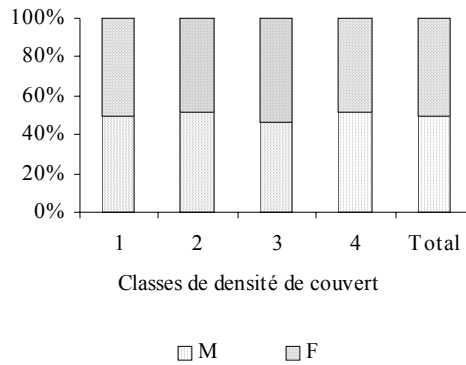


Figure 18: Sex-ratio dans les différentes zones de densité de couvert

De même, le poids moyen des pieds femelles (836 kg) ne diffère pas significativement ($P=0,883$, test T de Student) de celui des mâles (815 kg).

En revanche, pour la hauteur moyenne, on observe une différence significative ($P<0,1$, test T de Student) les femelle atteignant 4,2 m et les mâles seulement 3,8m.

En conclusion, la méthode permet une bonne estimation de la hauteur des arbres (erreur moyenne de 14%), les erreurs les plus importantes apparaissant sur des arbres de petite taille (inférieurs à 2 m) pouvant être mesurés directement sur le terrain.

La hauteur moyenne du peuplement est faible (3,7 m) et traduit probablement l'effet négatif de deux facteurs combinés: climat et dégradation anthropique. Cette dernière semble en effet particulièrement marquée dans ce milieu, et s'exprime à travers:

- des marques d'érosion du sol matérialisées par des griffes d'érosion et un décapage des horizons superficiels.
- de nombreuses souches et arbres mutilés.
- une très faible représentativité des individus asexués témoignant d'une régénération insuffisante et probablement d'une dynamique régressive.

Cette régénération naturelle est effectivement menacée par de nombreux agents de diverse nature, agissant isolément ou en synergie, et dont la responsabilité reste à définir:

- agents climatiques, qui s'expriment avec d'autant plus d'intensité que la protection du couvert des arbres se réduit.

- agents mécaniques qui se manifestent au niveau du sol en mettant en mouvement de grandes quantités de matériaux grossiers schisteux.
- agents biologiques tels les nombreux parasites qui se rencontrent dans les fruits ou les graines.
- agents anthropiques à travers la recherche de combustible de substitution comme les xérophytes épineuses qui semblent jouer le rôle de plante "nurse" à l'égard du Thurifère (cf. Photo n° 6), le pâturage qui élimine les jeunes plantules, les mutilations du houppier des arbres, l'abattage et le feu.

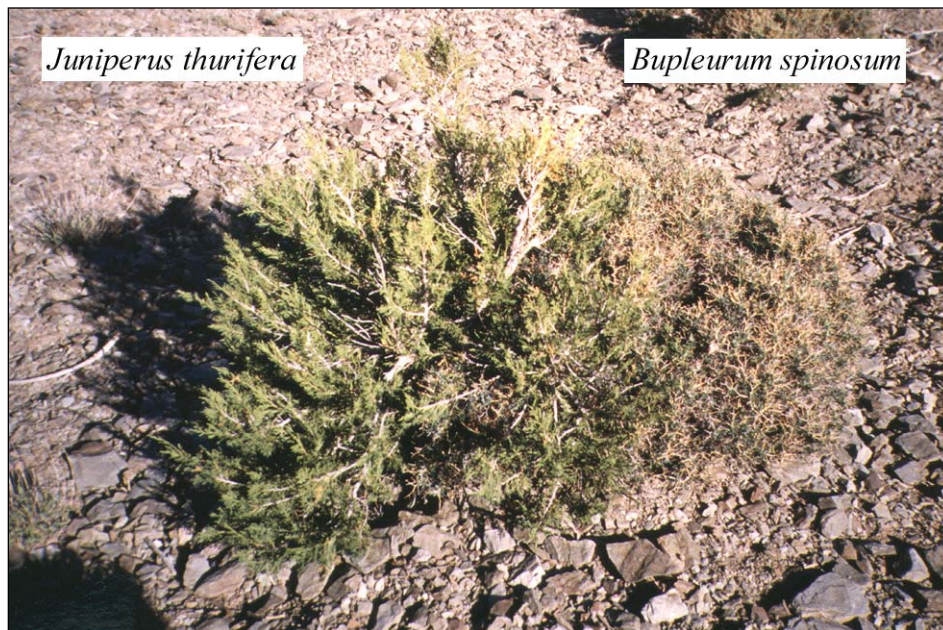


Photo n° 6

L'importance du rôle des plantes "nurses" dans la préservation des potentialités de régénération du peuplement (également observé chez *Juniperus monosperma* (Engelm.) Sarg. dans le Colorado par Tonnesen & Ebersole (1997), et sur d'autres espèces du genre *Juniperus* par Chambers *et al.*, 1999) semble confirmé par la présence de jeunes arbres en plus grand nombre dans les secteurs où le recouvrement du thurifère est faible et celui des xérophytes plus important. Dans une certaine mesure, ces plantes viennent donc atténuer l'impact de la dégradation sur la régénération du Thurifère.

La maturité sexuelle des genévriers thurifères semble intervenir plus précocement pour les mâles que pour les femelles, la taille minimale des individus sexués que nous avons échantillonnés étant de 1,5 m.

Après comparaison entre mâles et femelles de la hauteur moyenne, du poids moyen et du sex-ratio sous l'influence de divers paramètres tels que l'altitude ou la densité de couvert, il apparaît qu'aucune différence significative dans le sex-ratio, le poids ou la hauteur des arbres ne permet de conclure à un avantage en faveur des mâles dans les secteurs aux conditions écologiques limitantes.

Il s'avère même que la hauteur moyenne des femelles est significativement supérieure sur l'ensemble du peuplement, et qu'aux altitudes les plus élevées, leur poids moyen est légèrement supérieur à celui des mâles.

Les femelles ne semblent donc nullement défavorisées par le coût énergétique que leur impose la fructification, et on peut même penser que les faibles écarts observés entre mâles et femelles tant pondéraux que dendrométriques seraient peut être amplifiés en l'absence d'une dégradation qui atténue les différences entre les deux sexes.

En dépit des nombreuses dégradations observées dans le milieu et des problèmes de régénération affectant ce peuplement, il est surprenant de constater le parfait équilibre du sex-ratio. Cet équilibre entre mâles et femelles se retrouve d'ailleurs dans de nombreuses stations de genévriers thurifères, tant dans les milieux perturbés du Maroc comme la station de l'Oukaïmeden (Gauquelin *et al.*, 1992), que dans ceux plus préservés des Pyrénées françaises (Franc, 1994), des Alpes (Widmann, 1950; Borel & Polidori, 1983) ou d'Espagne (Gauquelin *et al.*, 1988).

Ces résultats permettent de formuler l'hypothèse suivante quant à la dynamique du peuplement: Si l'on postule que la dégradation, d'origine essentiellement anthropique, affecte indifféremment mâles et femelles (ce qui semble bien être le cas), alors, le sex-ratio de la population "initiale" est le même que celui de la population après dégradation, donc équilibré. Dans un milieu offrant de bonnes potentialités germinatives, devrait suivre une phase de recolonisation, au cours de laquelle les éléments pionniers seront favorisés. Il est fréquemment admis que ce sont les mâles qui remplissent cette fonction (car plus résistants aux conditions extrêmes), induisant de ce fait un déséquilibre du sex-ratio, comme c'est le cas dans les stations d'essaimage de cette espèce dans les Alpes (Borel & Polidori, 1983) ainsi que pour d'autres taxons tels *Juniperus communis* (Falinski, 1980). Or, dans les thuriféraires dégradées du Maroc, non seulement cette régénération fait défaut, mais de plus, les mâles ne semblent pas plus résistants que les femelles, ce qui conduit à la situation que nous observons actuellement: un peuplement dégradé au sex-ratio équilibré. D'autre part, la grande longévité de cette espèce induit une régénération lente et donc une grande inertie face aux perturbations

du milieu. Ainsi, il n'y a pas de "boom" germinatif comme dans le cas d'un sous bois soudain mis en lumière après une coupe d'éclaircie ou un chablis.

RÉSUMÉ

Les caractéristiques dendrométriques et le sex-ratio de la population

- ✓ Hauteur moyenne du peuplement: 3,7 m
- ✓ Sous représentativité des classes de hauteurs inférieures à 2,5 m
- ✓ Rôle des xérophytes en coussinet dans la régénération $\Rightarrow$ plantes "nurses"
- ✓ Proportion d'asexués: 12%
- ✓ Pas d'individus sexués inférieurs à 1,5 m
- ✓ Mâles sexués plus tôt que les femelles
- ✓ Sex-ratio de la population: 1/1
- ✓ Poids moyen: mâles (815 kg), femelles (836 kg) $\Rightarrow$ différence non significative
- ✓ Hauteur moyenne: mâles (3,8 m), femelles (4,2 m) $\Rightarrow$ différence significative

2.3. Vérification de la méthode d'évaluation de la phytomasse

2.3.1. Méthodologie

La méthode a été éprouvée par deux voies différentes: une vérification directe et une vérification indirecte.

Cette phase de vérification s'appuie sur deux études de phytomasse réalisées antérieurement au Maroc, dans un peuplement de Genévriers thurifères du Haut Atlas de Marrakech, selon la méthode classique d'abattage des arbres (Badri *et al.*, 1994). Lors de la première étude, 7 arbres ont été coupés mais n'ont pas été photographiés. Pour la seconde étude, seulement 3 arbres ont été abattus, mais des photos ont pu être réalisées avant l'abattage (Badri, données non publiées).

2.3.1.1. Vérification indirecte: relations phytomasse / données dendrométriques

Elle consiste à comparer, pour les 7 arbres abattus, la phytomasse des deux principaux compartiments (organes ligneux et organes chlorophylliens) et la phytomasse totale, avec le résultat d'estimations obtenues à partir de courbes de régression.

Nous avons donc recherché une relation liant la phytomasse à des caractères dendrométriques simples tels que projection du houppier, épaisseur du houppier, hauteur de l'arbre, etc. Pour certains arbres et arbustes, la projection du houppier peut suffire (Lyon, 1968), cependant dans notre cas, les meilleures corrélations ont été obtenues en utilisant le produit de la projection du houppier par la hauteur, assimilant de ce fait le volume de l'arbre à un cylindre. Cette forme géométrique est la plus communément employée (Scifres *et al.*, 1974; Bryant & Kothmann, 1979), bien que certains auteurs utilisent d'autres formes géométriques telles que le prisme notamment pour les espèces arbustives (Rittenhouse & Sneva, 1977; Uresk *et al.*, 1977; Huges *et al.*, 1987). Parmi les différentes équations de régression habituellement utilisées (Egunjobi, 1976), les équations logarithmiques (Baskerville, 1972) et linéaires (Lyon, 1968; Egunjobi, 1976) ont été testées et rejetées, ne retenant que l'équation polynomiale du second degré (Prado *et al.* 1987, Kauffman & Martin 1990) qui nous a donné le meilleur coefficient de détermination. Nous avons donc obtenu une relation du type: $y =$

$ax^2 + bx + c$, où y correspond à la phytomasse et x au produit de la hauteur par la projection du houppier.

Sur la Figure 19 et la Figure 20, on peut voir les équations de régression obtenues respectivement pour la phytomasse totale et les organes ligneux.

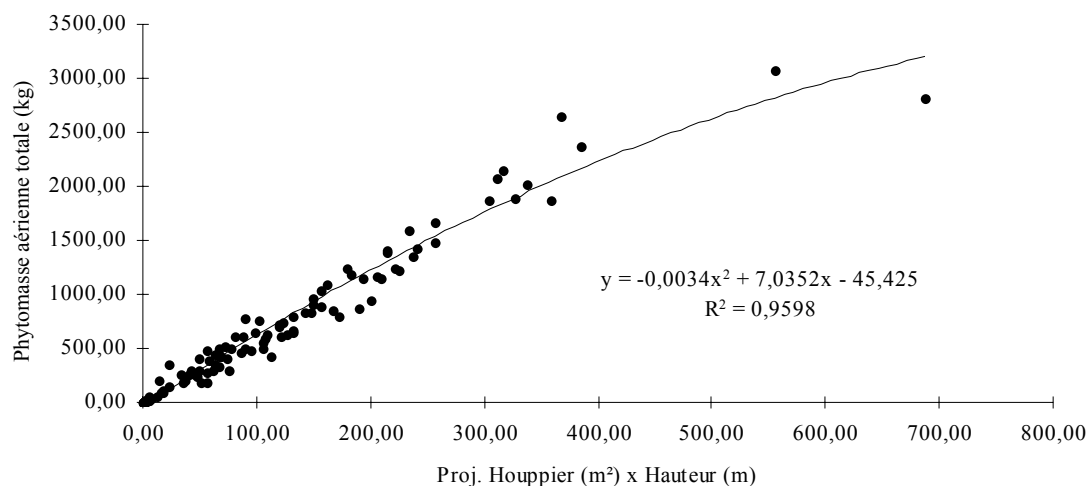


Figure 19

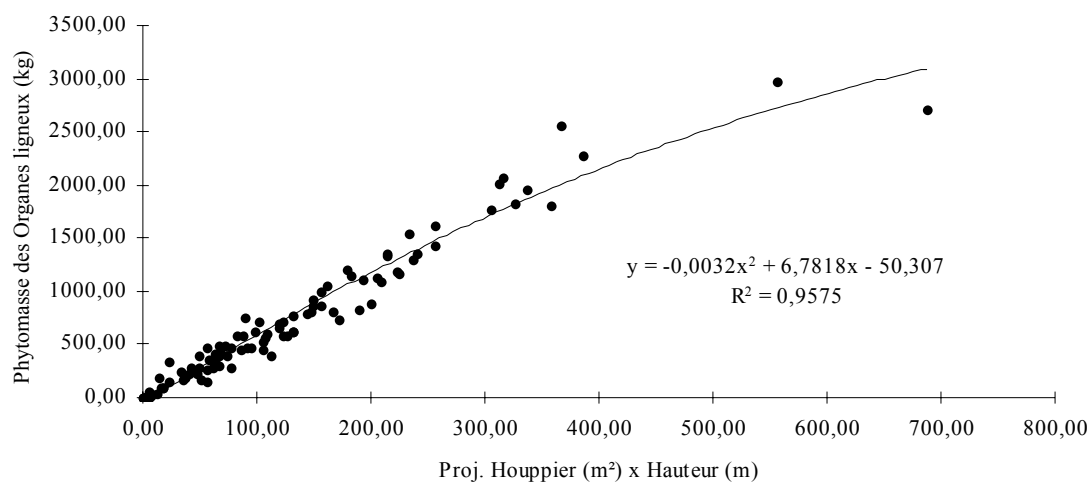


Figure 20

Ces deux équations sont relativement proches l'une de l'autre car la phytomasse des organes ligneux représente approximativement 90% de la phytomasse totale. On peut noter que la constante de l'équation est relativement élevée (respectivement $-45,425$ et $-50,307$) ce qui laisse présager une sous estimation systématique des petits individus, voire des valeurs de phytomasse négatives pour les plus petits d'entre eux. Cependant, la forte relation liant la phytomasse aux paramètres dendrométriques choisis (coefficient de détermination R^2 de 0,96) nous permet d'espérer une estimation fiable de la phytomasse totale et de la phytomasse des organes ligneux à partir de ce modèle, avec lequel on peut donc envisager l'étude de la phytomasse d'autres peuplements sur la base d'une simple étude dendrométrique.

Concernant la droite de régression obtenue pour la fraction "feuillage" à partir des mêmes caractéristiques dendrométriques (Figure 21), on peut noter que la dispersion des points est légèrement plus forte. Cependant, avec un coefficient de détermination de 0,94, le modèle reste fiable.

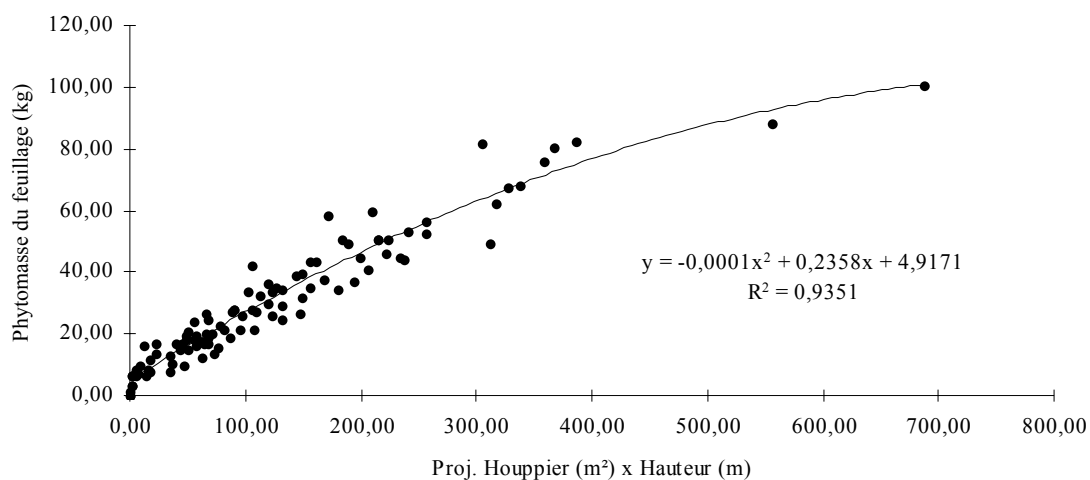


Figure 21

Ces trois modèles allométriques permettent donc d'obtenir une détermination relativement précise de la phytomasse d'un arbre et de ses différents compartiments, à partir de la simple connaissance de la hauteur et de la projection du houppier. Cependant, il faut garder à l'esprit que la courbe décrite par l'équation polynomiale de second degré correspond à la partie ascendante d'une courbe en cloche. Ainsi, pour des arbres dont le produit de la hauteur par la projection du houppier excède la valeur maximale obtenue sur les arbres échantillonnés, il

faut vérifier si l'on ne se situe pas dans la partie descendante de la courbe où une augmentation de la taille de l'arbre se traduit par une diminution de la phytomasse.

2.3.1.2. Vérification directe

Elle consiste à comparer la phytomasse des 3 arbres abattus lors de la seconde étude, avec le résultat de l'estimation de la phytomasse obtenu après codage des photos.

Les organes reproducteurs n'ayant pas été étudiés lors de l'abattage des arbres, les estimations obtenues pour ce compartiment n'ont donc pas pu être utilisées pour effectuer une vérification directe ou indirecte.

2.3.2. Résultats et discussion

La fiabilité de la méthode a été testée de façon indirecte, en utilisant les régressions obtenues pour les différents compartiments (cf. Figure 19, Figure 20 et Figure 21) afin d'estimer la phytomasse des 7 arbres dont on connaît déjà le poids (cf. Tableau 8). On a pu ainsi comparer les valeurs de biomasse mesurées (Badri *et al.*, 1994) à celles estimées par le modèle .

Arbre		Hauteur (m)	Ph (m ²)	Biomasse des Organes ligneux (kg)	Biomasse du Feuillage (kg)	Biomasse totale (kg)
1	Mesuré	4,5	8,0	475	19	494
	<i>Estimé</i>			190 (-60%)	13 (-29%)	203 (-59%)
2	Mesuré	6,5	17,0	536	17	552
	<i>Estimé</i>			660 (+23%)	30 (+79%)	690 (+25%)
3	Mesuré	6,9	15,0	630	26	656
	<i>Estimé</i>			617 (-1,9%)	28 (+7%)	646 (-1,5%)
4	Mesuré	7,4	23,7	909	36	945
	<i>Estimé</i>			1041 (+14%)	43 (+20%)	1084 (+15%)
5	Mesuré	8,2	25,0	1183	60	1243
	<i>Estimé</i>			1205 (+1,9%)	49 (-18%)	1254 (+0,8%)
6	Mesuré	10,0	50,0	2546	128	2674
	<i>Estimé</i>			2541 (-0,2%)	98 (-24%)	2622 (-1,9%)
7	Mesuré	12,5	72,0	3456	100	3556
	<i>Estimé</i>			3461 (+0,1%)	136 (-31%)	3532 (-0,7%)

Ph: Projection du houppier; () Pourcentage d'erreur

Tableau 8: Comparaison des valeurs mesurées aux valeurs estimées par le modèle

On peut remarquer que les valeurs estimées approchent fortement les valeurs mesurées (notamment pour les organes ligneux et la phytomasse totale), avec une erreur moyenne (correspondant à la moyenne des valeurs absolues) d'environ 7,4% pour les arbres 2 à 7. La biomasse de l'arbre 1 est largement sous estimée, avec un pourcentage d'erreur de 60% pour les organes ligneux et de 29% pour le feuillage. Cependant, cette sous estimation ne peut être complètement imputée à la méthode, car l'équation de régression obtenue par Badri *et al.* en 1994, lors de l'abattage de ces sept arbres, donne elle-même une forte sous estimation (275 kg au lieu de 494 kg, soit une erreur de 44%).

Les résultats de la vérification directe de la fiabilité de la méthode sont consignés dans le Tableau 9. La comparaison des valeurs de biomasse mesurées (Badri, données non publiées) avec celles estimées après codage montre une très bonne fiabilité pour les arbres 2 et 3, avec

un pourcentage d'erreur moyen variant de 2,4 à 5,3% pour les organes ligneux, et de 3,5 à 5,5% pour la biomasse totale.

Pour l'arbre 1, la phytomasse est sous estimée, notamment les parties ligneuses. Ceci peut s'expliquer par le fait que l'abroustissement intensif limite fortement la croissance en hauteur des arbres, tandis que l'accroissement radial se poursuit. Il peut en résulter des individus de petite taille présentant des troncs de fort diamètre comme cela a été évoqué plus haut.

Arbre		Hauteur (m)	Biomasse des Organes ligneux (kg) $\pm \sigma$	Biomasse du Feuillage (kg) $\pm \sigma$	Biomasse totale (kg) $\pm \sigma$
1	Mesuré	0,85	7,7	0,8	8,5
	Estimé		2,2 $\pm$ 0,4	3,3 $\pm$ 0,9	5,5 $\pm$ 1,0
2	Mesuré	2,1	95,5	6,5	102,4
	Estimé		97,8 $\pm$ 16,8	8,2 $\pm$ 2,2	106,0 $\pm$ 16,9
3	Mesuré	3,2	145,5	8,5	153,6
	Estimé		153,3 $\pm$ 26,5	8,8 $\pm$ 2,3	162,1 $\pm$ 26,6

σ = écart type

Tableau 9: Comparaison des valeurs mesurées aux valeurs estimée après codage des photos

Si l'estimation de la phytomasse du feuillage d'un individu particulier est entachée d'un pourcentage d'erreur parfois important, l'estimation de la phytomasse moyenne du feuillage, des organes ligneux, ou de la phytomasse moyenne totale d'un peuplement sera probablement plus précise dans la mesure où l'erreur moyenne est calculée sur des résultats parfois surestimé et parfois sous-estimés.

Ainsi, la comparaison des valeurs estimées et mesurées totales de la phytomasse des différents compartiments de ces 10 arbres révèle des écarts négligeables (cf. Tableau 10). En effet, le pourcentage d'erreur sur le total est de 0,76%, l'erreur la plus importante étant celle commise sur l'estimation de la phytomasse du feuillage, laquelle ne dépasse pas 4%.

	Phytomasse des Organes ligneux (kg)	Phytomasse du Feuillage (kg)	Phytomasse Totale (kg)
Mesuré	9983	402	10385
Estimé	9968	418	10306
% Erreur	0,15	4,00	0,76

Tableau 10: Pourcentage d'erreur par compartiments sur la phytomasse du peuplement

2.4. Intérêts, limites et avantages de la méthode

La principale limite de la méthode est la nécessité de pouvoir discerner sur la photo, le contour de l'arbre. Les houppiers de deux arbres voisins ne doivent donc pas ou peu se chevaucher. Il en découle que cette méthode est avant tout adaptée aux milieux ouverts comme les formations pré-steppiques, les matorrals et certaines forêts méditerranéennes, mais aussi aux savanes et toundra piquetées de ligneux. Sa précision étant en grande partie conditionnée par la densité des différents pixels, leur échantillonnage doit être représentatif du compartiment pour lequel ils codent. Un soin particulier doit donc être apporté à cette étape méthodologique.

Un des principaux avantages de cette méthode est sa facilité d'utilisation sur le terrain et son faible coût de mise en œuvre, puisqu'une personne seule peut réaliser le travail. Le matériel est en effet très léger, et aucun abattage d'arbre n'étant requis, une équipe de forestiers n'est pas nécessaire.

Cette méthode se montre en outre relativement fiable pour l'étude de la biomasse d'arbres isolés, aussi bien que pour l'estimation de la biomasse des peuplements. Prenant en compte l'architecture de l'arbre, elle permet également l'estimation de la biomasse et de la productivité d'espèces aux formes tourmentées telles que *Juniperus indica* (Esper *et al.*, 1995) ou *Pinus aristata* (Brunstein & Yamaguchi, 1992), qui ne peuvent être étudiées de ce point de vue, en utilisant des équations de régression basées sur de simples paramètres dendrométriques.

Cette méthode étant de plus non destructive, elle peut permettre de suivre l'évolution de la biomasse individuelle d'un arbre et de ses différents compartiments, en prenant des photos à plusieurs années d'intervalle. On peut donc envisager un suivi de l'accroissement en biomasse d'un individu, ou au contraire étudier sur une parcelle témoin, les effets du pâturage et des prélèvements de bois de feu.

Ne perturbant pas l'environnement, elle peut par ailleurs fournir des données précises de biomasse sur des écosystèmes fragilisés par une intense dégradation anthropique ou des changements climatiques (par exemple les peuplements à *Juniperus excelsa* dans les montagnes d'Oman (Fisher & Gardner, 1995)), ou encore sur des espèces protégées ou menacées comme l'arganier (*Argania spinosa*) au Maroc (El Yousfi & Benchekroun, 1992) ou le Pin aristé (*Pinus aristata*) dans les White Mountains an Californie (Fergusson, 1968).

3. CARACTERISTIQUES MORPHOLOGIQUES DES GENEVRIERS THURIFERES : "ETUDE DES FORMES"

Que ce soit à l'échelle stationnelle, régionale, nationale ou sur l'ensemble de son aire de répartition, le Genévrier thurifère présente une diversité architecturale importante, résultat de l'interaction entre des facteurs endogènes et exogènes dont il est parfois difficile de préciser le rôle. Certains types morphologiques sont communs à plusieurs pays, mais il existe également de nombreuses formes propres à chacun d'eux car liées à des pratiques culturelles locales ou régionales, à un usage social ou économique, ainsi qu'à des conditions écologiques particulières.

En France, on dénombre environ huit grands groupes architecturaux (Lathuillière, 1994a; Franc, 1994; Polidori, 1986):

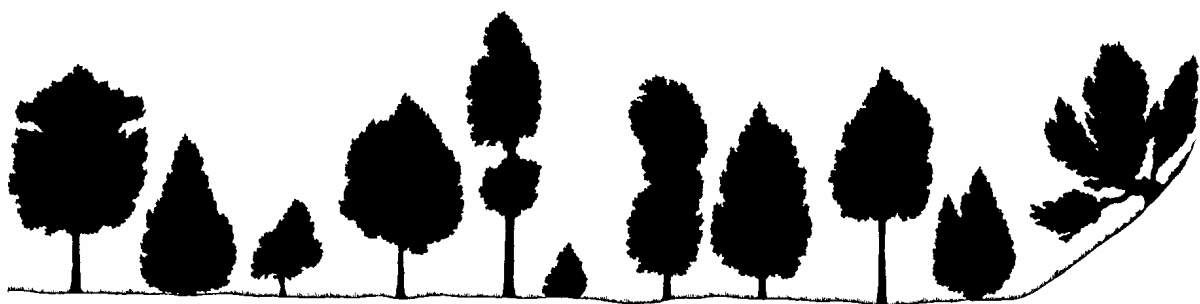
- La forme ovoïde: elle regroupe des arbres dont le houppier est bien développé (non dégradé), de forme globuleuse, et dont le tronc (généralement unique) est massif mais relativement court.
- La forme cupressoïde: comme son nom l'indique, elle correspond au type architectural du Cyprès. Le houppier est généralement peu étendu mais relativement développé en hauteur, partant dès la base de l'arbre. Ce type morphologique correspond généralement à celui de jeunes individus.
- La forme en "Quenouille": elle correspond à la forme cupressoïde mais dont le houppier ne débute pas dès la base du tronc.
- La forme conique: elle correspond à une forme cupressoïde dont le houppier est beaucoup plus élargi à la base.
- La forme arborescente: elle caractérise les arbres dont le houppier est généralement bien développé, de forme variable, et dont le tronc est souvent unique et bien dégagé du houppier.
- La forme en cépée: elle regroupe les arbres ayant développé des troncs multiples, conséquence des contraintes environnementales ou de facteurs endogènes.
- La forme en drapeau: elle est caractérisée par un houppier se développant sur un côté de l'arbre uniquement, et se manifeste généralement dans des situations exposées au vent, notamment sur les crêtes.
- La forme tourmentée: elle réunit des arbres souvent âgés, dont la variété de formes est généralement issue de nombreuses mutilations.

- La forme étalée: la largeur du houppier est très importante par rapport à la hauteur totale de l'arbre et la couronne descend souvent jusqu'au sol.

C'est dans les Alpes que l'on rencontre la plus grande diversité morphologique, dû à la grande variété de conditions stationnelles dans lesquelles se développe cette essence. Les facteurs à l'origine de la forme de l'arbre sont variés. On y trouve l'influence du climat (vent, neige, ...), de la pente, de l'exposition, du substrat rocheux et des phénomènes de compétition intra- et inter-spécifique dans les secteurs les plus denses. Les dégradations d'origine anthropique y sont actuellement négligeables, mais celles pratiquées par le passé sont encore visibles sur les plus vieux individus. L'âge est également un facteur intervenant dans la forme de l'arbre mais son effet est souvent masqué par les facteurs précédemment décrits.

Dans les peuplements pyrénéens, la superficie occupée par ce taxon est très réduite et les conditions écologiques relativement homogènes. On rencontre cependant plusieurs types morphologiques différents, mais concernant souvent un petit nombre d'individus. La forme conique y est très majoritaire, mais on y trouve aussi quelques individus au port tourmenté, cupressoïde, sphérique, étalé ou en cépée (Franc, 1994; Bertaudière *et al.*, 1999).

En Espagne, la superficie occupée par le Genévrier thurifère est telle que l'on y trouve toutes les formes décrites pour les populations françaises, mais également des formes particulières liées à diverses pratiques sylvicoles ou au pâturage (cf. Figure 22).



(d'après Blanco Castro *et al.*, 1997)

Figure 22: Différentes silhouettes de genévriers thurifères en Espagne

On y rencontre notamment des thurifères dont la base du tronc a été élaguée afin de permettre le développement d'une strate herbacée sous le houppier de l'arbre, pour favoriser le pâturage

(cf. Planche 2 p. 81, Photo n° 7). Cette pratique sylvicole permet en outre de récupérer les branches issues de l'élagage comme bois de chauffage.

Un autre type morphologique très particulier est celui présenté sur la Photo n° 8 (cf. Planche 2, p. 81), fréquent dans la région d'Arcones, mais nous ne possédons pas suffisamment d'éléments pour tenter d'expliquer le déterminisme de cette forme.

Au Maroc, dans les limites géographiques de la vallée de l'Azzaden, nous avons tenté de décrire les grands types architecturaux et de déterminer les facteurs qui en sont à l'origine.

Dans ce but, au codage numérique des arbres, issu de la méthode de mesure de la phytomasse, a été substitué un codage par couleurs, afin d'obtenir une représentation schématique de la forme des 102 individus échantillonnés. Ce type de représentation présente deux avantages pour une visualisation rapide de la forme générale de l'arbre:

- suppression de l'arrière plan et des ombres qui sur la photo constituent une gêne visuelle
- passage en mode bicolore permettant de distinguer plus facilement les différents compartiments de l'arbre (feuillage, tronc et branches).

3.1. Détermination des différents types morphologiques

Compte tenu de la grande diversité de formes rencontrées chez cette espèce, nous avons tenté de faire des regroupements en différents morphotypes. Pour cela, nous avons d'abord essayé d'élaborer une classification automatique en croisant divers paramètres tels que phytomasse du feuillage, phytomasse des organes ligneux, volume de la couronne par rapport au tronc et caractères dendrométriques (hauteur, projection du houppier, etc.). Les regroupements obtenus n'étant pas satisfaisants, nous avons donc choisi de baser notre classification sur des critères morphologiques simples, afin de préciser le rôle de la dégradation dans la morphogenèse, et d'améliorer éventuellement l'estimation de la phytomasse.

Dans cette optique, nous nous sommes donc surtout attachés aux critères jugés responsables des variations de phytomasse observés entre des individus présentant des valeurs de variable explicative (Projection du houppier x Hauteur) voisines. Les morphotypes ont donc été définis en réalisant des regroupements basés sur des critères tenant compte à la fois de la silhouette générale de l'arbre, mais également de la proportion entre les parties ligneuses visibles et les parties chlorophylliennes

Nous avons choisi de limiter le nombre de formes décrites, afin de conserver des critères d'identification simples permettant de préciser rapidement la forme de la plupart des individus. Au sein de chacun des ces groupes, il est donc possible de créer des subdivisions permettant de discriminer des formes particulières. Dans le morphotype "houppier au sol", il est ainsi possible de distinguer une forme particulière de dégradation dû au pâturage: la forme en "Bouclier" illustrée par la Photo n° 9 (Planche 2, p. 81). Mais tenir compte d'un grand nombre de détails dans la description des formes ne garantit pas nécessairement une plus grande précision lors de l'estimation de certains paramètres tel que la phytomasse. Lors d'une analyse de la forme des tiges de cèdres du Maroc, M'Hirit & Postaire (1983) estime que la qualité des résultats de l'analyse des formes est en général conditionné par le choix d'un nombre réduit de paramètres décrivant l'architecture d'ensemble de ces formes.

Ainsi, sur notre échantillonnage de 102 arbres, six groupes de formes ont pu être discriminés (les silhouettes de tous les arbres échantillonnés peuvent être consultées en annexe (pages 197 à 201):

- la forme **Houppier au sol (H)**
- la forme **Étalée (E)**
- la forme **Arborescente (A)**
- la forme **Troncs Multiples (TM)**
- la forme **Cierge (C)**
- la forme **Indéterminée (I)**



Photo n° 7

Élagage d'un Genévrier thurifère
(Arcones, Espagne)



Photo n° 8

Genévrier thurifère
(Arcones, Espagne)



Photo n° 9: Port en "bouclier" d'un Genévrier thurifère pâturé (Maroc)

Planche 2



La forme "Houppier au Sol" caractérise les arbres dont on ne voit pas le tronc, leur feuillage descendant jusqu'au sol. La surface de projection du houppier est généralement importante comparée à la hauteur de l'arbre, et les silhouettes sont relativement variées.



La forme "Étalée" est dérivée de la forme "Houppier au sol", à la différence que le ou les troncs sont légèrement visibles dans la partie inférieure. De plus, la largeur du houppier dépasse très largement la hauteur totale de l'arbre, laquelle est généralement très réduite.



La forme "Arborescente" regroupe les arbres présentant généralement un nombre réduit de tiges, et un volume du houppier équilibré par rapport aux parties ligneuses visibles. Le ou les troncs sont souvent massifs, témoignant de l'âge important de ces individus, tandis que le houppier présente un contour plus ou moins ovoïde.



La forme "Tronc Multiples" regroupe les arbres présentant une ramification intense dès la base du tronc. Ces arbres présentent généralement une grande variabilité tant au niveau du diamètre des tiges que de la forme du houppier.



La forme "Cierge" est caractérisée par des individus aux houppiers de taille très réduite et au tronc souvent unique. Ces arbres présentent donc un très fort déséquilibre entre les parties ligneuses et les parties chlorophylliennes.



La forme "Indéterminée" regroupe quant à elle tous les arbres qui n'ont pu être classés dans les ensembles ci-dessus, car présentant des caractéristiques morphologiques particulières que nous n'avons pas retrouvées sur d'autres individus.

Parmi tous ces critères morphologiques choisis, certains ne sont pas mutuellement exclusifs. Il en résulte que certains individus peuvent en cumuler plusieurs. Ainsi, un arbre peut posséder un "houppier au sol" de forme "étalée", ou encore être "arborescent" mais à "troncs multiples". Dans ce cas, c'est le critère qui s'exprime le plus qui a été retenu. Lorsque les deux critères s'expriment avec la même force, ce sont les observations de terrain (état sanitaire général de l'arbre, densité du feuillage, nombre de tiges coupées, etc.) qui permettent de choisir la forme qui lui sera affectée. Si le doute persiste, l'arbre sera classé dans le groupe des formes "indéterminées".

3.2. Le déterminisme des formes

3.2.1. Relation Forme-Hauteur

Si l'on s'intéresse à la hauteur des arbres dans les différents groupes morphologiques (cf. Figure 23), on peut noter des variations parfois importantes entre les formes, tant dans le nombre d'arbres concernés par chacune d'elle, que dans leur hauteur moyenne, minimale et maximale.

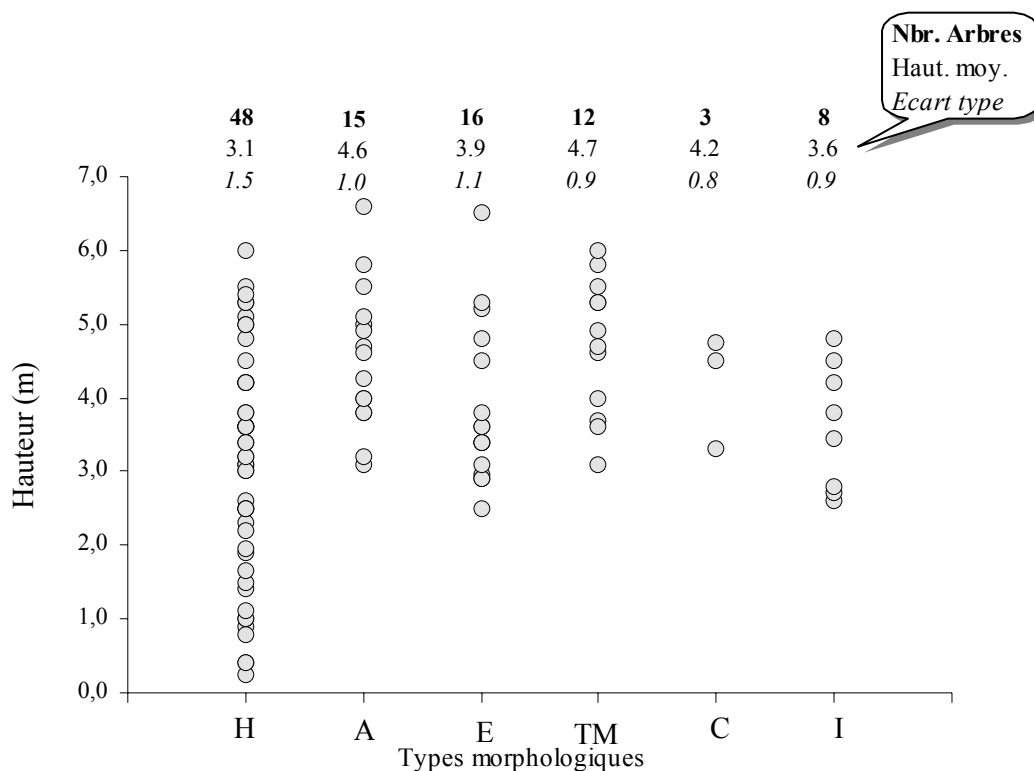


Figure 23: Hauteur des arbres pour les différents morphotypes définis

Les arbres appartenant à la forme "Houppier au sol" se répartissent dans toutes les classes de hauteur, des arbres les plus petits (25 cm) aux arbres les plus grands (6 m). C'est le seul morphotype que l'on rencontre chez les arbres d'une hauteur inférieure à 2,5 m.

Cette catégorie est majoritaire, représentée par 48 individus sur un total de 102 (soit 47%), dont la hauteur moyenne est de 3,1 m. Cette faible hauteur moyenne s'explique par le fait que la forme la forme H regroupe un grand nombre d'individus de petite taille, et d'autre part qu'elle se rencontre majoritairement à l'altitude supérieure où la croissance apicale des arbres est réduite (port prostré caractéristique).

La forme arborescente se caractérise par des arbres d'une hauteur supérieure à 3 m, le plus grand d'entre eux atteignant 6,6 m, ce qui constitue la hauteur maximale pour l'ensemble des arbres échantillonnés. Il en résulte une hauteur moyenne importante de 4,6 m.

Le type morphologique "Étalé" regroupe des arbres de hauteur variable, le plus petit d'entre eux atteignant 2,5 m, et le plus grand 6,5 m, la hauteur moyenne pour ce groupe étant de 3,9 m. Bien que très inférieurs en nombre aux arbres de forme "Houppier au sol", cette catégorie n'en reste pas moins relativement bien représentée, avec un total de 16 arbres, soit 15,7%.

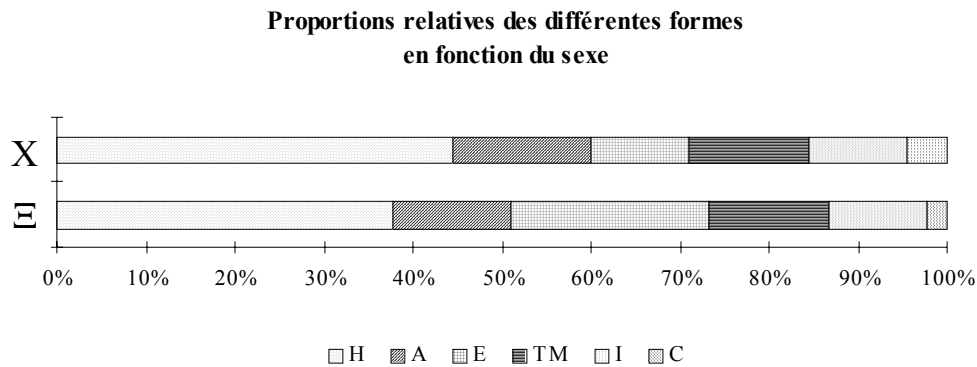
La forme "Troncs Multiples" est un petit (seulement 12 individus sur 102), dont la taille des arbres variant de 3,1 m à 6 m apparaît relativement homogène. Les individus sont relativement grands comparés aux autres morphotypes, la hauteur moyenne qui atteint 4,7 m constituant un maximum.

La forme Cierge est minoritaire, représentée seulement par 3 arbres (soit 16 fois moins que dans le groupe H). Sa hauteur moyenne est de 4,2 m, et l'individu le plus petit mesure 3,3 m.

Le dernier groupe rassemble des arbres aux formes indéterminées, avec des hauteurs comprises entre 2,6 et 4,8 m, la hauteur moyenne atteignant 3,6 m.

3.2.2. Le déterminisme sexuel

Afin de déterminer si certaines formes se retrouvent préférentiellement chez les mâles ou les femelles, nous avons comparé le pourcentage de chacune d'elle dans les deux sexes (cf. Figure 24).

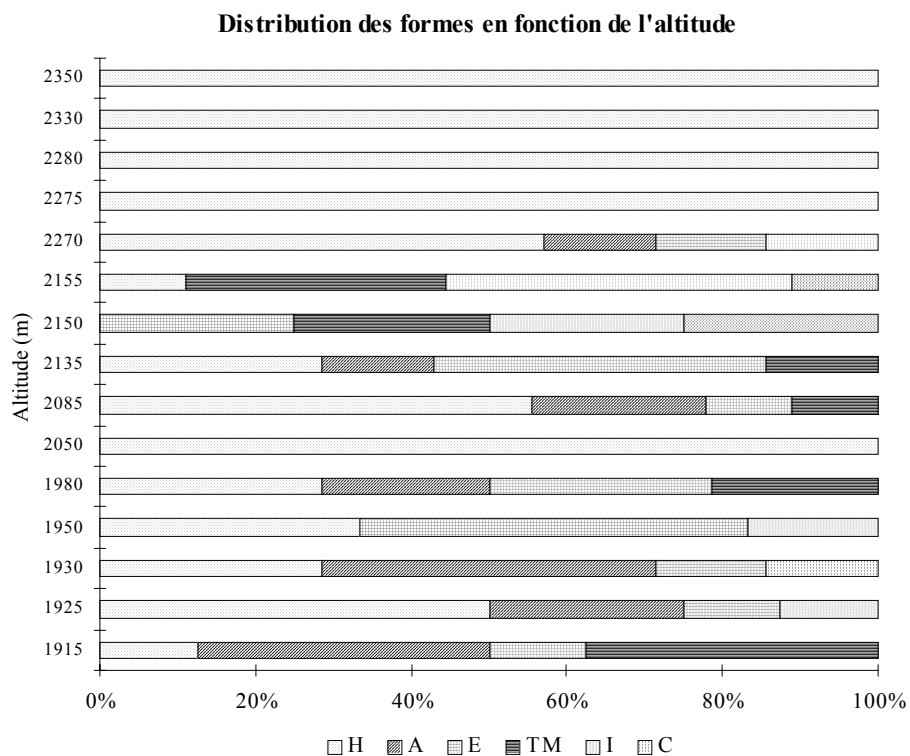
**Figure 24**

Sur cette figure, il apparaît que les six groupes morphologiques se rencontrent dans les deux sexes, et en proportions sensiblement identiques. Les différences sont mineures et portent essentiellement sur deux types morphologiques: le type H ("Houppier au sol") et le type E ("Étalé"), ce dernier étant mieux représenté chez les mâles que chez les femelles.

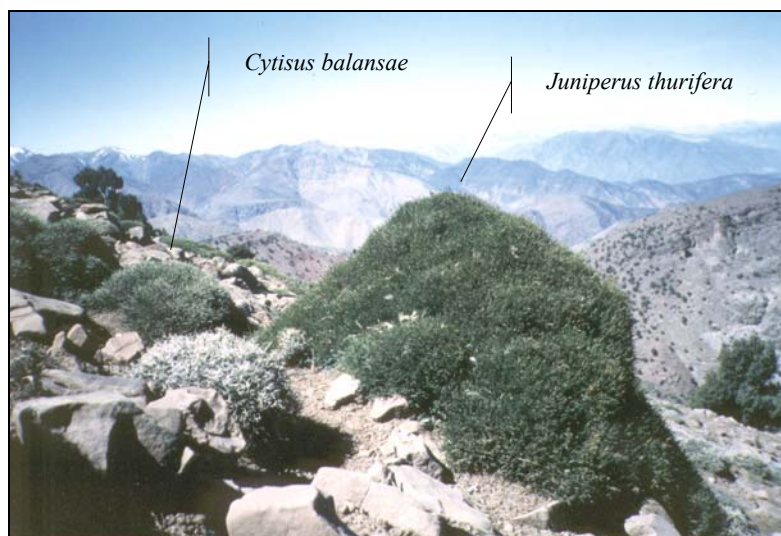
La forme de l'arbre ne semblerait donc pas être sous le contrôle d'un déterminisme sexuel.

3.2.3. Le déterminisme altitudinal

L'influence de l'altitude sur la morphologie est en revanche nettement perceptible (Figure 25). Aux altitudes les plus élevées de la zone d'étude (à partir de 2275 m), on peut en effet remarquer la présence exclusive de la forme "Houppier au sol". Ceci peut s'expliquer par les conditions climatiques particulières qui règnent à la limite supérieure du peuplement.

**Figure 25**

Le vent, la neige et le froid intense en hiver concourent à modeler les végétaux selon un schéma caractéristique qui leur confère une forme dite en "coussinet" pour les espèces de petite taille comme les xérophytes épineuses (Quézel, 1967; Payette, 1974) et que nous avons appelé "houppier au sol" dans le cas du Thurifère. Les jeunes arbres peuvent alors présenter des formes convergentes avec celles des espèces qui les accompagnent tel *Cytisus balansae* (cf. photo ci-dessous).

**Photo n° 10: Convergence de formes**

Ce morphotype ne se rencontre cependant pas uniquement aux hautes altitudes. On le retrouve tout au long du gradient altitudinal (excepté dans le relevé effectué à 2150 m), révélant ainsi que l'altitude ne serait pas le seul facteur à l'origine de ce type architectural. En effet, deux autres facteurs importants semblent s'y ajouter: l'âge de l'arbre et l'abrouissement par le bétail.

Aux altitudes plus faibles, ces deux facteurs sont pratiquement indissociables, et agissent souvent en synergie: l'intense pâturage des branches basses et moyennes par les chèvres confère aux arbres un port prostré et compact, surtout observé chez les jeunes individus dont le houppier est plus facilement accessible au troupeau. Mais la forme "houppier au sol" est aussi celle qu'adoptent les jeunes thurifères en l'absence de toute dégradation (Lemoine-Sébastien, 1965). En effet, en France par exemple, dans des peuplements préservés, les jeunes arbres ont un port "cupressoïde" ou "conique", dont le houppier descend jusqu'au sol (Franc, 1994; Lathuillière, 1994a). Le pâturage a donc comme principale conséquence de maintenir les arbres dans ce type morphologique juvénile alors qu'il ne devrait être qu'un stade de transition vers une forme adulte telle que la forme arborescente.

Ainsi, si l'on fait exception de la différence de taille, on observe une convergence de forme entre les genévriers thurifères et les xérophytes épineuses qui les côtoient, que ce soit sous la contrainte du climat plus sévère de la limite supérieure du peuplement, ou sous la contrainte d'un pâturage intense aux altitudes plus basses, associé au jeune âge de l'arbre.

3.2.4. Le déterminisme anthropique

Afin d'isoler un "signal" potentiel de la dégradation du milieu à travers les formes des arbres, nous avons défini à partir des formes précédemment décrites, deux groupes morphologiques distincts: un groupe comprenant les morphotypes issus d'une dégradation de faible intensité et un groupe comprenant les morphotypes issus d'une dégradation de forte intensité.

Dans le premier groupe, nous avons rassemblé la forme E (Étalée), la forme C (Cierge) et la forme I (Indéterminée).

- La forme **E** semble être le résultat d'un pâturage intensif qui limite la croissance apicale des arbres et provoque l'étalement du houppier par le piétinement régulier de la couronne par le troupeau.
- La forme **C** est le résultat d'intenses mutilations par les habitants en vue de récolter du bois de chauffage. La plupart des branches sont coupées, ne laissant souvent que quelques moignons sur un tronc unique, lui-même fortement mutilé. Ce type architectural semble être le stade de dégradation ultime de la forme arborescente avant la disparition totale du feuillage conduisant à la mort de l'arbre.
- La forme **I** regroupe principalement des arbres ayant fait l'objet de très nombreuses mutilations tant par la hache (pour les approvisionnement en bois de chauffage ainsi que pour nourrir le troupeau), que par le feu (allumé par les bergers directement au pied de l'arbre pour se réchauffer), ou le bétail.

Dans le deuxième groupe, nous avons rassemblé la forme **A** (Arborescente) et certains arbres appartenant à la forme **H** (Houppier au sol).

- La forme **A** peut être considérée dans notre milieu, comme le type architectural étant le moins dégradé, et donc probablement le plus proche de la forme adulte d'un Thurifère ayant fait sa croissance à l'abri des perturbations anthropiques.
- Certains arbres de la forme **H**, situés à la limite supérieure du peuplement, sont relativement préservés de la dégradation et doivent leur forme principalement à l'influence de l'altitude comme nous l'avons précédemment exposé.

Les arbres appartenant au groupe morphologique "Troncs multiples" n'ont pas été pris en compte, car il nous été impossible d'isoler avec certitude l'effet de la dégradation de celui d'un éventuel déterminisme génétique, sur leur morphologie. Selon Fritts (1976), chez la plupart des espèces, la croissance des bourgeons latéraux est inhibée par la croissance active de l'apex (phénomène de "dominance apicale"). Or selon cet auteur, chez certaines espèces, notamment les genévriers, la dominance des bourgeons apicaux est faible, ce qui entraîne une forme multitroncs. Dans le cas du Genévrier thurifère, la coupe anarchique de branches maîtresses, voire de la tige principale, viendrait donc affaiblir une dominance apicale déjà réduite. Ce

type architectural apparaît donc être déterminé à la fois par des facteurs anthropiques et des facteurs endogènes. Dans les stations françaises dans lesquelles la récolte de bois de thurifère n'a plus cours depuis de nombreuses années, on rencontre fréquemment des individus à plusieurs tiges, même parmi les arbres très jeunes (Lathuillière, 1994a). Dans ce cas, l'hypothèse du rôle des facteurs endogènes est à privilégier.

La Figure 26 représente donc la proportion relative des formes de faible et de forte dégradation dans les différentes zones de densité du peuplement.

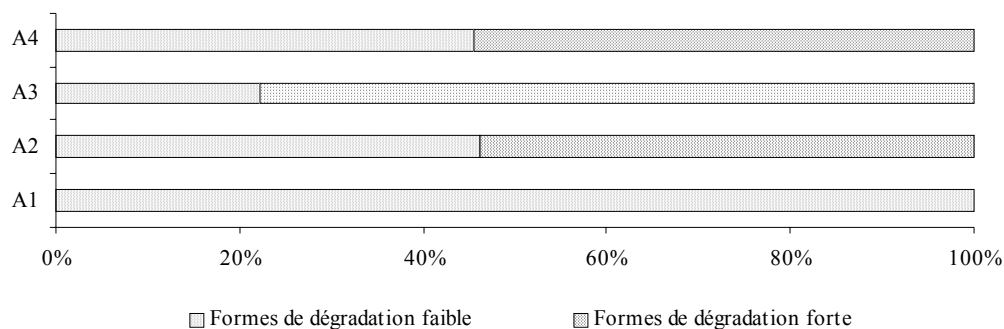


Figure 26: Proportion relative des formes de dégradation en fonction de la densité du couvert

Dans la zone de faible densité, on ne rencontre aucune forme de dégradation forte. Ceci s'explique par le fait que cette zone correspond, dans le secteur étudié, à la limite altitudinale supérieure de la thuriféraie, où le facteur dominant qui limite le développement des arbres est l'altitude et non d'éventuelles perturbations anthropiques. Il est donc normal qu'il n'y ait pas de relation directe entre la densité d'arbres et la dégradation.

Dans la zone de densité 3, les types morphologiques engendrés par une forte dégradation sont nettement majoritaires (75%), alors que dans les zones de densité 2 et 4, les proportions sont équilibrées. Nous n'observons donc pas d'augmentation de la dégradation des zones de forte densité vers les zones de faible densité, ce qui signifie que ce n'est pas dans les zones les plus clairsemées que l'on rencontre une dégradation plus importante. Il faut donc probablement envisager l'influence conjointe de deux facteurs:

- variabilité des conditions écologiques entre les différentes zones de densité (pente, exposition, etc.)

- variabilité des perturbations anthropiques (intensité, nature, durée, etc.)

3.3. Amélioration de l'estimation de la phytomasse par l'étude des formes

Outre la possibilité de caractériser l'importance de la dégradation des arbres par l'étude de leur forme, il est intéressant de savoir si une classification morphologique des individus peut éventuellement permettre d'améliorer l'estimation de la phytomasse en obtenant un meilleur ajustement de la régression linéaire.

Dans le Tableau 11 sont donc présentées les équations polynomiales de second degré du type $y = ax^2 + bx$ et leur coefficient de détermination (R^2), obtenus pour chaque compartiment et pour chaque type morphologique, et dans lesquelles "y" est la phytomasse exprimée en kg, et "x" le produit de la projection du houppier par la hauteur. La ligne "Total" correspond à l'équation obtenue sur l'ensemble des 102 arbres de l'échantillonnage, et représente la valeur étalon nous servant de comparaison.

Quel que soit le morphotype ou le compartiment considéré, le choix de l'équation polynomiale de second degré avec comme variable explicative le produit de la projection du houppier par la hauteur s'avère être judicieux puisque les coefficients de détermination sont tous supérieurs à 0,90, la grande majorité d'entre eux oscillant entre 0,97 et 0,99.

Si l'on compare maintenant chaque morphotype avec la valeur de référence correspondant au regroupement de toutes ces formes, on peut remarquer que pour les morphotypes H, E, A, et C, tous les coefficients de détermination sont bien meilleurs que ceux de l'équation générale, et ceci quel que soit le compartiment considéré. Seules les valeurs obtenues pour la forme Cierge sont à relativiser étant donné le petit nombre d'arbres concernés (3 individus seulement).

Dans le cas des morphotypes TM et I, les coefficients de détermination des compartiments Organes ligneux et Feuilles sont également supérieurs à ceux de l'équation de référence, ceux de la phytomasse totale étant quant à eux inférieurs.

		Compartiments		
		Organes ligneux	Feuilles	Total
Types morphologiques	H	Équation	$y = -0,0002x^2 + 5,7983x$	$y = -0,0004x^2 + 6,105x$
		R ²	0,98	0,98
	E	Équation	$y = -0,0037x^2 + 6,4797x$	$y = -0,0038x^2 + 6,755x$
		R ²	0,99	0,99
	A	Équation	$y = 0,0031x^2 + 5,601x$	$y = 0,0029x^2 + 5,8955x$
		R ²	0,99	0,98
	TM	Équation	$y = 0,0029x^2 + 5,1074x$	$y = 0,0025x^2 + 5,4135x$
		R ²	0,98	0,94
	C	Équation	$y = -0,1911x^2 + 18,63x$	$y = -0,1972x^2 + 19,454x$
		R ²	0,97	0,97
	I	Équation	$y = 0,0001x^2 + 4,2822x$	$y = -0,0002x^2 + 4,6682x$
		R ²	0,97	0,90
	Total	Équation	$y = -0,0026x^2 + 6,3487x$	$y = -0,0028x^2 + 6,6441x$
		R ²	0,96	0,96

Tableau 11: Relations phytomasse-Paramètres dendrométriques (Projection du houppier Hauteur) pour les différents morphotypes

Ainsi, bien que les équations par compartiment obtenues initialement sur les 102 arbres soient satisfaisantes, le regroupement des arbres par morphotype permet d'accroître sensiblement la précision du modèle, notamment pour le compartiment des Feuilles pour lequel le coefficient de détermination initialement de 0,92 atteint des valeurs comprises entre 0,96 et 0,99.

3.4. Conclusion

Dans les peuplements du Maroc, seuls les arbres les moins dégradés peuvent renseigner sur le rôle des facteurs endogènes dans le déterminisme morphologique des individus. Dans notre cas, seul l'effet de l'âge a pu être mis en évidence notamment chez les jeunes arbres, dont le port présente toujours un houppier atteignant le sol, ce morphotype ayant été constaté dans des stations plus protégées de son aire de répartition (par exemple dans les Pyrénées françaises et les Alpes), avec toutefois un houppier plus allongé (forme cupressoïde). L'effet de l'âge est également perceptible à travers la forme "Arborescente" qui caractérise les arbres âgés et peu dégradés. En revanche aucun déterminisme sexuel n'a pu être mis en évidence, tous les morphotypes étant représentés dans les deux sexes et en égale proportion.

Concernant les facteurs exogènes susceptibles d'intervenir sur la forme générale, deux d'entre eux ont été mis en évidence: l'altitude (à travers les conditions climatiques qui caractérisent ce milieu telles que chutes de neige et gel par exemple) et le facteur anthropique. Il est fort probable que des facteurs abiotiques tels que le vent, la pente, l'exposition ou les chutes de pierres interviennent également, mais leur rôle est masqué par l'impact prédominant de la dégradation, comme cela est peut être le cas pour le déterminisme sexuel.

Dans la zone d'étude, les effets de l'altitude semble se manifester aux environ de 2200 mètres, par la présence exclusive de la forme "houppier au sol", même chez des individus de grande taille. L'effet de l'âge est donc à écarter, de même qu'un éventuel impact de la dégradation, laquelle semble très réduite à cette altitude.

Partout ailleurs, c'est la nature et l'intensité des mutilations qui orientent les arbres vers un morphotype particulier. On peut donc distinguer les dégradations essentiellement dues au pâturage, de celles provoquées par l'effet synergique du pâturage et de la récolte de bois de chauffage. Dans le premier cas, on aboutit souvent à la forme "Étalée" et à la forme "Houppier au sol" par suite de l'action directe de l'abrouissement de la couronne par le troupeau. Dans le second cas, les arbres étant plus grands, le pâturage s'exprime indirectement à travers la coupe du feuillage par le berger (écimage) lorsque les chèvres ne peuvent atteindre seules le houppier. S'y ajoute le prélèvement de branches maîtresses destinées au chauffage. Ceci conduit au morphotype que nous avons baptisé "forme Indéterminé", et au stade de dégradation ultime appelé "forme Cierge" dans lequel le houppier est presque inexistant, l'exemple le plus extrême étant celui du peuplement de Zaouiat Ahansal dans le Haut Atlas Central. Dans certaines thuriféraires, Lemoine-Sébastien (1965) notait une exploitation en têtard des arbres, mais dans la zone d'étude, nous n'avons remarqué de signes indiquant une telle pratique sylvicole.

Au total, sur les six morphotypes que nous avons décrits, quatre sont des formes de dégradation, et deux sont principalement sous la dépendance de facteurs soit endogènes (l'âge), soit altitudinaux, la forme "Houppier au sol" appartenant à ces deux catégories à la fois, expliquant peut être sa plus forte représentativité dans l'échantillonnage.

Dans les secteurs les plus menacés, où les arbres sont peu nombreux et de forme très tourmentée, il est essentiel d'obtenir des données de phytomasse les plus précises possible. Dans ce cas, afin d'améliorer les estimations de phytomasse obtenues à partir du modèle basé sur l'échantillon total, il apparaît intéressant de tenir compte de la classification

morphologique que nous avons établie précédemment, afin d'utiliser les équations de régression propres à chaque morphotype.

RÉSUMÉ

Caractéristiques morphologiques des genévriers thurifères:

Étude des formes

✓ Six morphotypes décrits:

① (**Houppier** au sol) ⇒déterminisme endogène (l'âge) et exogène (l'altitude, le pâturage)

① (**Étalé**) ⇒déterminisme exogène (le pâturage)

① (**Arborescent**) ⇒déterminisme endogène (l'âge)

① (**Troncs Multiples**) ⇒déterminisme probablement endogène et exogène (dominance apicale insuffisante)

① (**Cierge**) ⇒déterminisme exogène (dégradation intensive + pâturage)

① (**Indéterminé**) ⇒déterminisme exogène (dégradation + pâturage)

✓ Pas de mise en évidence d'un éventuel déterminisme sexuel

✓ Précision accrue de l'estimation de la phytomasse en utilisant les équations de régression obtenues pour chaque morphotype

4. ÉVALUATION DE LA PHYTOMASSE DES XEROPHYTES

4.1. Méthodologie

L'étude de la phytomasse des xérophytes porte uniquement sur le secteur où elles sont en mélange avec le Genévrier thurifère. Plusieurs considérations justifient ce choix:

- L'étude des photographies aériennes de la vallée ne nous a pas permis une cartographie précise des limites de la zone xérophytique supraforestière.
- Les prélèvements de bois par la population locale portent principalement sur l'aire délimitée par la thuriféraie, plus accessible et plus proche du village.

Au sein de la thuriféraie, l'étude de phytomasse a porté sur les quatre espèces les plus représentées et susceptibles de servir de combustible: *Alyssum spinosum* L., *Bupleurum spinosum* L., *Ormenis scariosa* L. et *Cytisus balansae* Benth. Ssp. *Balansae* (Boiss.) (cf. Planche 3, p. 95).

L'échantillonnage a été effectué dans les parcelles ayant servi à l'étude de la phytomasse du Genévrier thurifère. Au total, nous avons donc étudié 16 placettes réparties dans quatre secteurs, où le recouvrement par le Thurifère est variable (10%, 23%, 29%, 76%).

L'étude du pourcentage de recouvrement de cette phytocénose est basée sur l'utilisation du coefficient de "Dominance" tel qu'il a été défini par l'école Zuricho-Montpelliéraine.

Ainsi, dans nos placettes, nous avons attribué à chaque espèce un code numérique correspondant à une classe de recouvrement.

<u>Classe de recouvrement</u>	<u>Centre de classe</u>
+ : Recouvrement < 1%	0,5
1 : recouvrement compris entre 1 et 5%	3
2 : recouvrement compris entre 5 et 25%	15
3 : recouvrement compris entre 25 et 50%	37,5
4 : recouvrement compris entre 50 et 75%	62,5
5 : recouvrement compris entre 75 et 100%	87,5

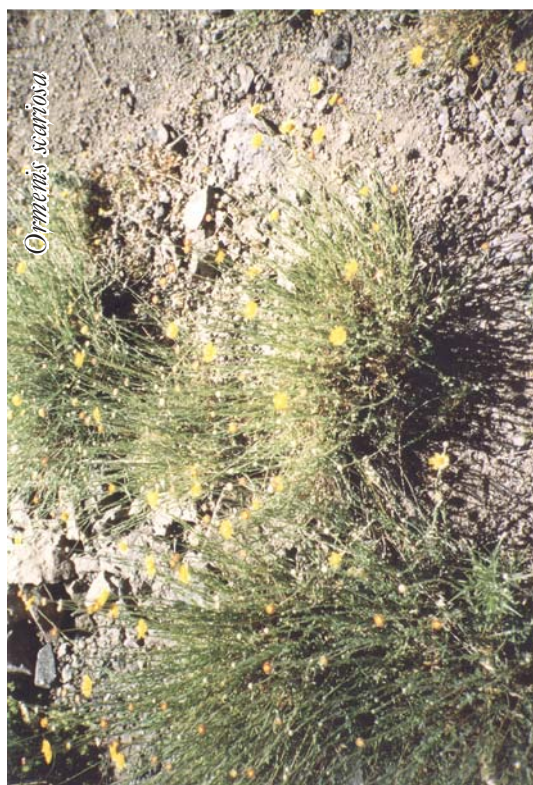
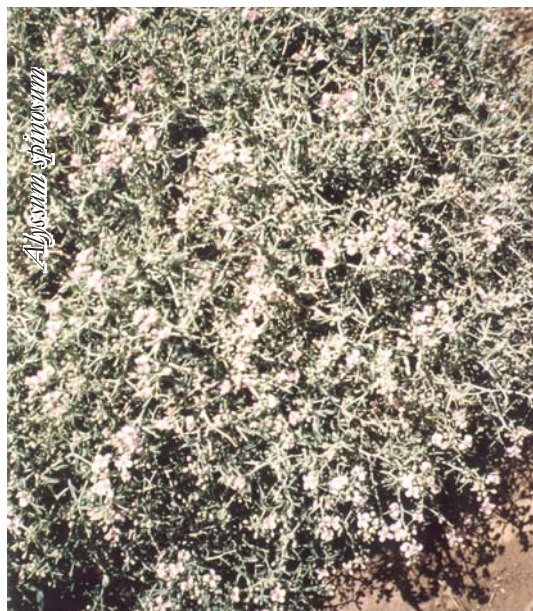


Planche 3

Dans un deuxième temps, pour chacun de ces quatre taxons, nous avons prélevé 10 échantillons de taille variable (coupe au ras du sol), afin d'établir une relation entre la phytomasse et surface de la touffe. Pour chaque individus, cette surface a été mesurée en calculant le diamètre moyen (moyenne géométrique de deux diamètres perpendiculaires), auquel on applique la formule de la surface du disque:

$$S = 0,25 \pi d^2$$

Les valeurs de phytomasse sont exprimées en poids sec, la teneur en eau étant estimée après passage à l'étuve à 85°C pendant trois jours d'une fraction représentative de chacun des échantillons.

Pour chaque espèce, le rapport du poids anhydre sur la surface de la touffe a donc été déterminé et exprimé en g/m². Nous avons ensuite calculé le produit de ce rapport avec le recouvrement estimé de chaque taxon au sein de chacune des parcelles, afin d'en établir la phytomasse (les valeurs de recouvrement utilisées correspondant au centre de classe du coefficient de dominance affecté à l'espèce).

Enfin, pour chaque espèce, nous avons ensuite moyenné résultats obtenus pour les quatre parcelles d'une même zone de densité, afin d'extrapoler ces valeurs à l'ensemble du milieu étudié.

4.2. Résultats et discussion

Les résultats obtenus individuellement pour chaque échantillon (poids frais, poids anhydre, diamètres, surface, etc.) peuvent être consultés en annexe (cf. tableaux p. 195 et 196).

Dans le Tableau 12 sont consignés, pour chacune des quatre valeurs moyennes de recouvrement par le Thurifère, le pourcentage de recouvrement ainsi que la phytomasse des différentes xérophytes en coussinet étudiées.

	Pourcentage de recouvrement dans les zones inter-canopées	Phytomasse (t/ha)
Recouvrement par le thurifère: 10%		
<i>Alyssum spinosum</i>	32,5	18,4
<i>Bupleurum spinosum</i>	9,0	4,8
<i>Cytisus balansae</i>	8,3	6,1
<i>Ormenis scariosa</i>	0,0	0,0
<i>Total</i>	49,8	29,2
Recouvrement par le thurifère: 23%		
<i>Alyssum spinosum</i>	3,8	1,8
<i>Bupleurum spinosum</i>	8,4	3,8
<i>Cytisus balansae</i>	0,8	0,5
<i>Ormenis scariosa</i>	13,9	5,8
<i>Total</i>	26,8	11,9
Recouvrement par le thurifère: 29%		
<i>Alyssum spinosum</i>	9,0	4,0
<i>Bupleurum spinosum</i>	15,0	6,3
<i>Cytisus balansae</i>	0,8	0,4
<i>Ormenis scariosa</i>	0,8	0,3
<i>Total</i>	25,5	11,1
Recouvrement par le thurifère: 76%		
<i>Alyssum spinosum</i>	1,5	0,2
<i>Bupleurum spinosum</i>	5,4	0,7
<i>Cytisus balansae</i>	3,8	0,7
<i>Ormenis scariosa</i>	0,9	0,1
<i>Total</i>	11,5	1,8
Thuriféraie totale	36,7	18,2

Tableau 12: Recouvrement et phytomasse des Xérophytes

Si l'on compare les différents secteurs entre eux, on peut noter que le pourcentage de recouvrement total des xérophytes est très inégal, variant de 11,5% à 50%. L'importance de cette couverture par les xérophytes dans les zones inter-canopées se révèle être inversement proportionnelle à celle du Genévrier thurifère, cette relation inverse entre recouvrement de la strate chaméphytique et de la strate arborée à genévriers ayant également été observée dans

des formations à *Juniperus monosperma* à l'ouest des États-Unis (Tausch *et al.*, 1981; Pieper, 1990; Davenport *et al.*, 1998). Il semble donc qu'il y ai des phénomènes de compétition entre le Genévrier thurifère et les xérophytes à la fois:

- sous le couvert de l'arbre: en effet, comme cela a été évoqué dans le chapitre "Caractéristiques dendrométriques et sex-ratio de la population", nous avons pu constater sur le terrain que la présence de xérophytes sous le houppier des arbres est peu fréquente, probablement dû à une compétition pour la lumière, mais aussi pour l'eau, la réhumectation des couches profondes du sol sous couvert étant tardive et incomplète (Gauquelin & Savoie, 1990). Il en résulte que plus la surface couverte par la couronne des arbres augmente, plus la surface disponible pour le développement des xérophytes diminue.
- Dans les zones inter-canopées, cette compétition pour la nutrition minérale et les ressources hydriques est intense. Certains auteurs (Barth, 1980; Davenport *et al.*, 1996; Breshears *et al.*, 1997a) considèrent que les genévriers sont plus aptes à extraire l'eau et les éléments minéraux des sols superficiels des zones hors couvert que les espèces chaméphytiques, réduisant et même parfois éliminant ces espèces (Tausch & Tueller, 1990), contribuant ainsi à accroître l'hétérogénéité édaphique (Breshears *et al.*, 1997b).

L'augmentation du recouvrement des xérophytes s'accompagne d'une augmentation de la phytomasse. Variant de 2 à 29 t/ha, c'est à la limite supérieure du peuplement, au niveau de l'écotone Thuriféraie-Xérophytaie, que la phytomasse des xérophytes, qui se substituent au Thurifère, est maximale, leur recouvrement moyen y étant cinq fois plus important que celui du Thurifère (cf. Photo n° 5, p. 59).

Dans chaque secteur, on peut remarquer de grandes inégalités de phytomasse et de recouvrement entre les différents taxons. Ces xérophytes présentant des exigences écologiques variées, ces inégalités reflètent la variabilité des conditions stationnelles qui caractérisent ce milieu. Ainsi, dans la zone de faible recouvrement par le Thurifère, la prédominance d'*Alyssum spinosum* inhérente à l'altitude, plus élevée que dans les autres parcelles échantillonnées (Emberger, 1939). En effet, cette espèce alticole est moins thermophile que *Bupleurum spinosum*, et moins hygrophile que *Cytisus balansae* (Haloui, 1986). Elle est donc plus résistante aux conditions climatiques qui caractérisent la limite supérieure de la Thuriféraie. Mais cette espèce est également bien représentée dans les autres secteurs, car ses exigences écologiques sont proches des conditions climatiques générales de

la vallée (hiver froid et sécheresse estivale). A l'opposé, *Ormenis scariosa* quant à elle est une espèce qui se cantonne généralement aux altitudes les plus basses de la Thuriféraie.

D'une manière générale, ces données de phytomasse sont relativement élevées, et constituent une réserve ligneuse non négligeable (cf. Tableau 13).

	Phytomasse (t/ha)
Recouvrement par le thurifère: 10%	
<i>Genévrier thurifère</i>	27
<i>Xérophytes</i>	29
<i>Total</i>	56
Recouvrement par le thurifère: 23%	
<i>Genévrier thurifère</i>	58
<i>Xérophytes</i>	12
<i>Total</i>	70
Recouvrement par le thurifère: 29%	
<i>Genévrier thurifère</i>	67
<i>Xérophytes</i>	11
<i>Total</i>	78
Recouvrement par le thurifère: 76%	
<i>Genévrier thurifère</i>	209
<i>Xérophytes</i>	2
<i>Total</i>	211
Thuriféraie totale	
<i>Genévrier thurifère</i>	49
<i>Xérophytes</i>	18
<i>Total</i>	67

Tableau 13: Phytomasse des Xérophytes et du Thurifère en fonction de la densité du couvert arboré

Dans la zone à 10% de recouvrement par le Thurifère, il est intéressant de noter que la phytomasse des xérophytes dépasse celle des genévriers thurifères. Cette valeur est non seulement plus forte que celle du Thurifère, mais elle est également plus élevée que celle obtenue pour certaines formations méditerranéennes arbustives ou arborescentes telles que le peuplement à *Juniperus occidentalis* étudié par Cannell (1982), la tétraclinaie étudiée par Haloui (1992), ou encore la phytomasse de *Juniperus phoenicea* avancée par Tsiourlis (1992) dans une formation de maquis (cf. Tableau 1).

Le recouvrement du Genévrier thurifère augmentant, la phytomasse des xérophytes diminue ensuite rapidement pour atteindre seulement 2 t/ha dans les secteurs présentant une couverture xérophytique réduite (recouvrement de 11,5%).

Sur l'ensemble de la thuriféraie, la contribution des xérophytes à la phytomasse ligneuse du peuplement est donc élevée puisqu'elle représente 18 t/ha, soit plus du tiers de celle du Genévrier thurifère, et porte ainsi à 67 t/ha la phytomasse totale du peuplement.

Sur la Figure 27, on peut remarquer que le passage de la Thuriféraie vers la Xérophytaie ne se fait pas selon un gradient altitudinal, mais en fonction du recouvrement par le Genévrier thurifère.

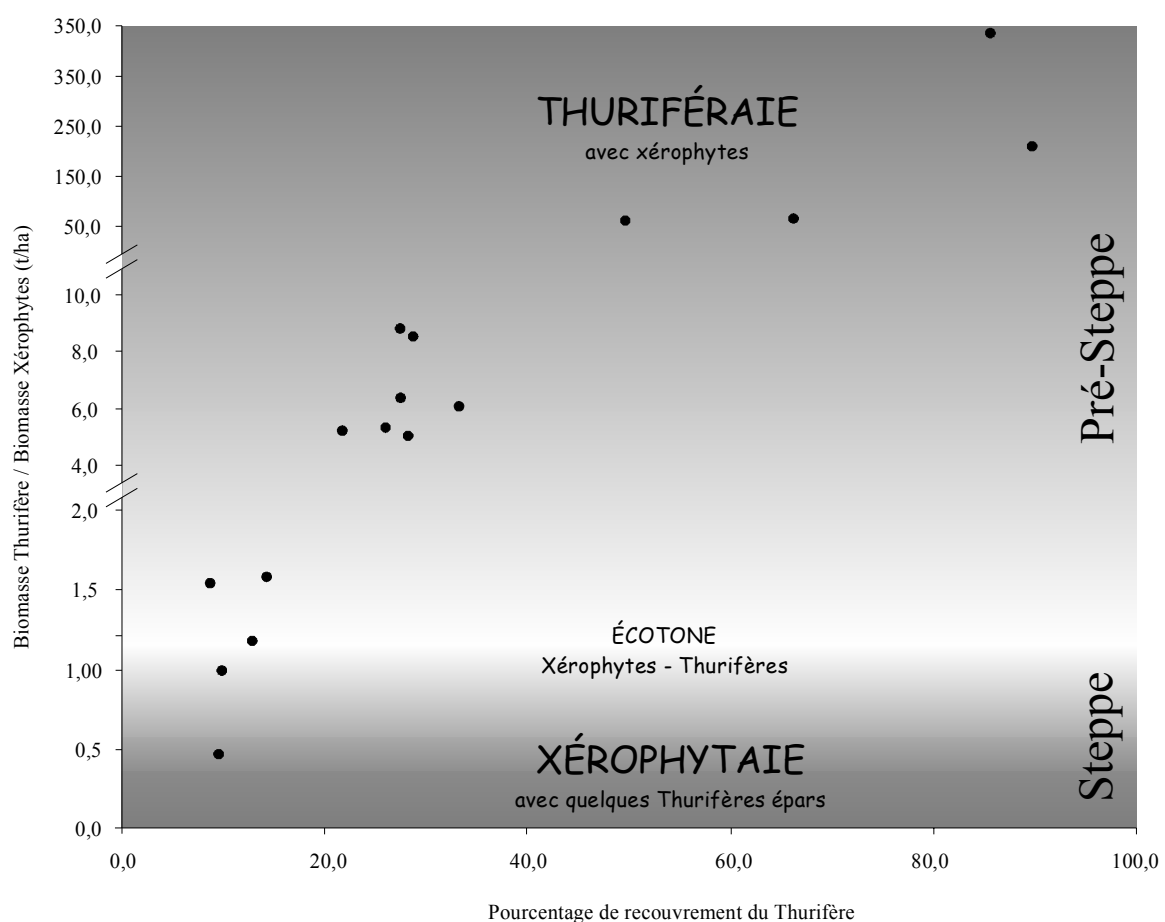


Figure 27: Évolution de la proportion relative entre le Thurifère et les xérophytes en fonction du recouvrement arboré

On peut donc noter une analogie entre l'effet de l'altitude et celui de la baisse du recouvrement arboré sur l'évolution du ratio biomasse du Thurifère / biomasse des xérophytes. L'écotone altitudinal coïncide ici avec le basculement d'un milieu à biomasse arborée dominante, vers un milieu à biomasse xérophytique dominante.

Dans cet écosystème, l'ouverture du milieu qui marque le passage de la thuriféraie vers la xérophytaie se réalise donc selon deux voies, l'élévation en altitude et la dégradation, induisant la transition d'une formation arborée pré-steppique, vers une formation steppique.

4.3. Conclusion

Parmi les quatre espèces xérophytiques que nous avons pris en compte pour l'estimation de la phytomasse (*Alyssum spinosum*, *Bupleurum spinosum*, *Cytisus balansae* et *Ormenis scariosa*) nous avons rencontré de fortes inégalités au sein des différents secteurs étudiés, tant au niveau du recouvrement que de la phytomasse, en liaison avec les exigences écologiques de chacune. Parmi elles, *Alyssum spinosum* est l'espèce que l'on rencontre le plus fréquemment, ce taxon aux préférences alticoles participe, en effet, à environ 32% du recouvrement par les xérophytes à la limite supérieure du peuplement, le recouvrement total étant de 50%.

De la Thuriféraie la plus dense à la Thuriféraie la plus clairsemée, on note une augmentation progressive de la couverture xérophytique, qui passe de 11,5% à 50%, et confirme nos observations de terrain selon lesquelles il est peu fréquent de rencontrer des xérophytes sous le couvert des arbres.

Il s'ensuit que la phytomasse évolue également de manière inversement proportionnelle à celle du Genévrier thurifère, variant de 2 t/ha à 29 t/ha, la valeur maximale dans "l'écosystème Thurifère" étant atteinte à la limite supérieure du peuplement, dans la zone de transition entre la Thuriféraie et la Xérophytaie. Au niveau de cet écotone, la phytomasse des xérophytes dépasse celle du Genévrier thurifère, et atteint des valeurs comparables à celles enregistrées dans certaines junipérais méditerranéennes et nord-américaines. Sur l'ensemble de la Thuriféraie, la phytomasse des xérophytes reste très élevée (18 t/ha), contribuant à plus de 25% à la phytomasse aérienne totale de l'écosystème.

Bien que confinées dans la strate chaméphytique et colonisant des milieux aux conditions climatiques particulièrement sévères, ces xérophytes en coussinet constituent donc un potentiel ligneux considérable, d'autant plus important qu'il concerne la limite supérieure

forestière mais aussi la zone asylvatique dans laquelle les xérophytes sont encore plus abondantes. Compte tenu des superficies qu'elles occupent dans le Haut Atlas marocain, et de la phytomasse qu'elles représentent, notamment aux hautes altitudes, ces phytocénoses sont donc à prendre en considération dans toute étude de phytomasse des formations méditerranéennes d'altitude.

RÉSUMÉ

Évaluation de la phytomasse des xérophytes

- ✓ Pourcentage de recouvrement des xérophytes inversement proportionnel à celui du Genévrier thurifère
- ✓ Recouvrement variant de 11,5% à 50% (moyenne 37%)
- ✓ Phytomasse variant de 2 t/ha à 29 t/ha (moyenne 18 t/ha)
- ✓ Phytomasse moyenne = 25% de la phytomasse aérienne totale

3^{EME} PARTIE: POTENTIALITES DU MILIEU: MINERALOMASSE ET STOCK CARBONE

1. ÉVALUATION DE LA MINERALOMASSE EPIGEE DU PEUPLEMENT

Selon Duvigneaud (1974), la minéralomasse traduit l'accumulation par les plantes de substances minérales puisées dans le sol.

Ainsi, à travers l'étude de la composition minérale des principales espèces du peuplement, nous avons voulu aborder un des aspect du cycle des éléments minéraux dans les écosystèmes forestiers méditerranéens d'altitude. Cette étude doit permettre d'une part d'évaluer la minéralomasse des bioéléments majeurs (Ca, K, Mg, N), afin de pouvoir estimer les pertes consécutives à la dégradation du milieu, et d'autre part de préciser les exigences de cette phytocénose en terme de nutrition minérale. Pour les même raisons méthodologiques que celles évoquées lors de l'étude de la phytomasse, l'appareil racinaire n'a pas été pris en compte. Nous allons donc doser les éléments minéraux des différents compartiments du Genévrier thurifère, ainsi que ceux des xérophytes.

1.1. Méthodologie

1.1.1. Échantillonnage

L'échantillonnage a été réalisé aléatoirement, sans tenir compte des classes de recouvrement du Thurifère précédemment établies. Chaque échantillon a été prélevé sur un individu différent.

Pour l'étude de la composition minérale du Thurifère, le nombre d'échantillons prélevés pour chaque compartiment varie en fonction de son hétérogénéité supposée et se répartit comme suit:

- Troncs ou branches: 10 carottes prélevées à la tarière de Pressler, à une hauteur de 1,3 m.
- Rameaux ($\odot < 2$ cm): 20 échantillons.
- Feuillage: 20 échantillons

- Galbules: 10 échantillons ont été prélevés, correspondant chacun à un groupe de galbules portés par le même rameau.

Pour l'étude de la composition minérale des xérophytes (les espèces étudiées étant celles ayant fait l'objet des estimations de phytomasse), 10 échantillons ont été récoltés sur chacune des 4 espèces. Chaque échantillon qui comprend un mélange de feuillage et de parties ligneuses, est considéré comme représentatif de la totalité de la plante.

1.1.2. Techniques d'analyse de la minéralomasse employées

Toutes les minéralisations ont été réalisées sur de la matière végétale séchée à l'étuve jusqu'à poids constant à 85°C, puis broyée. Seuls les bioéléments majeurs, Calcium (Ca), Magnésium (Mg), Potassium (K) et Azote (N) ont été étudiés. Les trois premiers éléments ont été dosés après calcination au four avec prédigestion nitrique (Morard & Gullo, 1970). Le dosage a été réalisé au spectrophotomètre d'absorption atomique sur des sauces d'extraction diluées (2 fois pour K et Na, et 10 fois pour Ca et Mg), ou à l'H.P.L.C. (High Performance Liquid Chromatography) sur des sauces d'extraction brutes. L'azote quant à lui a été dosé au carbographe (NA 2100).

1.2. Résultats et Discussion

1.2.1. La minéralomasse du Genévrier thurifère

1.2.1.1. Teneur en éléments minéraux des différents compartiments

L'étude de la teneur en éléments minéraux des différents compartiments de l'arbre (Figure 28) met en évidence la prédominance de l'ion calcium dans le feuillage, les rameaux, le tronc et les branches. Cette forte teneur en calcium va, par l'intermédiaire des chutes de litières, participer à la neutralisation de l'acidité du sol comme cela a été mis en évidence par Gauquelin *et al.* (1992). La plus forte teneur en potassium est enregistrée dans les galbules, seul compartiment pour lequel cet ion est majoritaire, les teneurs en azote y étant également,

avec le compartiment "feuillage", parmi les plus élevées (également observé par Leonardi & Rapp, 1980, sur les fructifications et le feuillage du Chêne vert dans le Monte Minardo, Italie). Les teneurs en magnésium sont quant à elles toujours relativement faibles dans tous les compartiments.

La hiérarchisation quantitative des différents éléments se résume donc ainsi:

Troncs/branches, rameaux, feuilles: $\text{Ca} \gg \text{N} > \text{K} > \text{Mg}$

Galbules: $\text{K} > \text{N} > \text{Ca} > \text{Mg}$

Cette plus forte concentration en potassium dans les galbules s'explique probablement par les translocations internes d'éléments. En effet, le potassium est considéré comme un élément mobile, alors que calcium et magnésium sont des éléments peu mobiles (Myre & Camiré, 1994). Il est donc compréhensible de le trouver en plus grande quantité dans les galbules, situés à l'extrémité des rameaux. Nous pouvons de plus remarquer que cet élément décroît également des parties terminales de l'arbre vers les parties basales (galbules > feuilles > rameaux > troncs/branches) (cf. Figure 28).

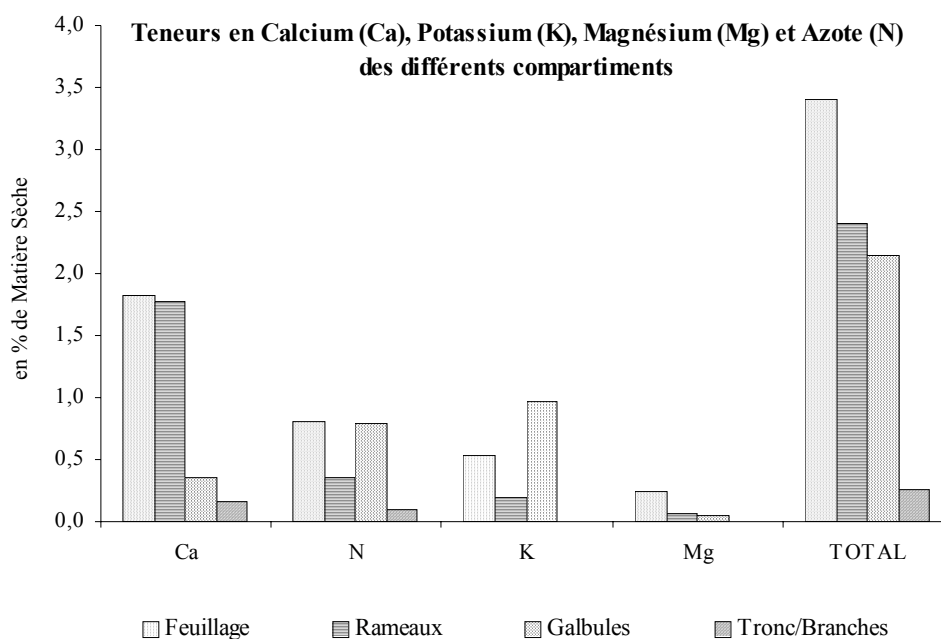


Figure 28: Teneur en éléments minéraux des différents compartiments

Il est intéressant de remarquer que les teneurs relatives des éléments minéraux dans les galbules sont différentes de celles des organes ligneux, évitant peut être une certaine concurrence, notamment pour le calcium, entre organes reproducteurs et appareil végétatif au

moment de la fructification. Ceci rejoint nos précédentes observations selon lesquelles les arbres femelles ne semblent pas désavantagés, en terme de biomasse, par la production de cônes. De plus, les travaux de Gauquelin (données non publiées) sur l'importance du sexe de l'arbre sur la teneur en éléments minéraux des feuilles révèlent une concentration en potassium dans les feuilles des arbres femelles deux fois plus importante que celle des mâles, qui pourrait constituer ainsi une réserve minérale pouvant être mobilisée lors de la fructification.

Les teneurs en éléments minéraux des organes ligneux nous indiquent que les quatre éléments étudiés sont en plus faible proportion dans les troncs et les branches que dans les rameaux. Ces résultats sont probablement à mettre en parallèle avec l'âge des différents tissus, Ranger *et al.* (1992) ayant observé des transferts de N, K, et Mg depuis les organes âgés vers les organes en activité. Myre & Camiré (1994) remarquent également que chez les conifères, l'aubier est très fréquemment plus riche en éléments minéraux que le bois de cœur. Cependant, il faut aussi tenir compte de la plus grande proportion d'écorce dans les rameaux, laquelle présente généralement de fortes concentrations en éléments minéraux (Ranger *et al.*, 1992; Myre & Camiré, 1994). Entre les feuilles et le compartiment troncs/branches, les rameaux constituent donc un lieu de transition à la fois physique et chimique.

Concernant les concentrations en éléments minéraux dans les feuilles, nos résultats rejoignent ceux de Velasco & Albadera (1966) sur le Genévrier thurifère en Espagne dans la région de Guadalajara, ainsi que ceux de Badri *et al.* (1994) sur la Thuriféraie de la station de l'Oukaïmeden au Maroc. En revanche, la teneur en bioéléments dans les organes ligneux apparaît beaucoup plus importante dans le peuplement de l'Oukaïmeden que dans celui que nous avons étudié. Cette différence est peut-être à rapprocher de la plus forte dégradation du milieu et plus précisément du sol dans notre site d'étude, pouvant entraîner certaines carences dans la nutrition minérale des arbres, mais aussi de la nature chimique du substrat, celui de l'Oukaïmeden, de nature permotriassique et intercalé de bancs calcaires, pouvant être plus riche en calcium, élément majeur de la minéralomasse.

1.2.1.2. Minéralomasse des différents compartiments

La minéralomasse aérienne de la station pour les quatre éléments considérés, s'élève à 1059 kg/ha dont 865 kg/ha de calcium, 98 kg/ha de potassium, 65 kg/ha d'azote et 32 kg/ha de magnésium. Si l'on s'intéresse à la minéralomasse globale de ces bioéléments dans chaque

organe, on trouve 972 kg/ha d'éléments minéraux dans les branches et troncs, 25 kg/ha dans les rameaux, 59 kg/ha dans les feuilles et 3 kg/ha dans les galbules.

La comparaison de la minéralomasse totale de ces quatre éléments avec celle d'autres formations forestières (nous ne comparerons pas ici la teneur de chaque élément car les substrats sont très variables), fait apparaître que la minéralomasse du Thurifère est élevée en dépit d'une phytomasse réduite (Tableau 14), notamment par rapport aux peuplements d'Épicéa commun et de Pin laricio qui présentent une minéralomasse (exprimée en pour-cent de la phytomasse) environ quatre fois plus faible. Ceci est probablement à mettre en relation avec une capacité de stockage supérieure, illustrée par les fortes teneurs en calcium, et/ou une richesse supérieure en cations du sol. En revanche, la Thuriféraie montre des valeurs très proches de celles obtenues sur les chênaies marocaines et françaises.

Essence (Localisation)	Phytomasse (kg/ha)	Minéralomasse (kg/ha)	Minéralomasse (en % de la phytomasse)	Source
<i>Pinus nigra</i> Arn. Ssp. <i>laricio</i> Poiret (Corse)	55 707	364	0,65	(Ranger, 1981)
<i>Picea abies</i> Karst (Vosges, France)	428 105	1941	0,45	(Ranger <i>et al.</i> , 1992)
<i>Quercus ilex</i> L. (Maroc oriental)	43 500	1239	2,84	(Haloui, 1992)
<i>Quercus ilex</i> L. (France)	49 693	1233	2,48	(Archibold, 1995)
<i>Juniperus thurifera</i> L. (Azzaden, Maroc)	49 000	1059	2,16	Présente étude

Tableau 14: Données bibliographiques de phytomasse et minéralomasse d'écosystèmes forestiers

1.2.2. La minéralomasse des xérophytes

La teneur en éléments minéraux des quatre espèces xérophytiques étudiées met en évidence des différences entre les taxons tant au niveau de la proportion relative de ces bioéléments, que de la concentration totale (Figure 29).

L'ordre d'importance des trois cations, calcium, potassium et magnésium, est la même pour les quatre espèces ($\text{Ca} > \text{K} \gg \text{Mg}$). En revanche, les teneurs en azote sont hétérogènes, et *Cytisus balansae* montre une forte concentration en cet élément (environ 50% de plus que dans les autres taxons), alors qu'il présente de faibles teneurs pour les autres cations. Cette forte teneur en azote est à mettre en relation avec son appartenance au groupe des légumineuses, fixatrices d'azote.

Pour les différentes espèces, le classement des éléments minéraux par concentration croissante est donc le suivant:

Ormenis scariosa: $\text{Ca} > \text{K} > \text{N} > \text{Mg}$

Alyssum spinosum et *Bupleurum spinosum*: $\text{Ca} > \text{N} > \text{K} > \text{Mg}$

Cytisus balansae: $\text{N} > \text{Ca} > \text{K} > \text{Mg}$

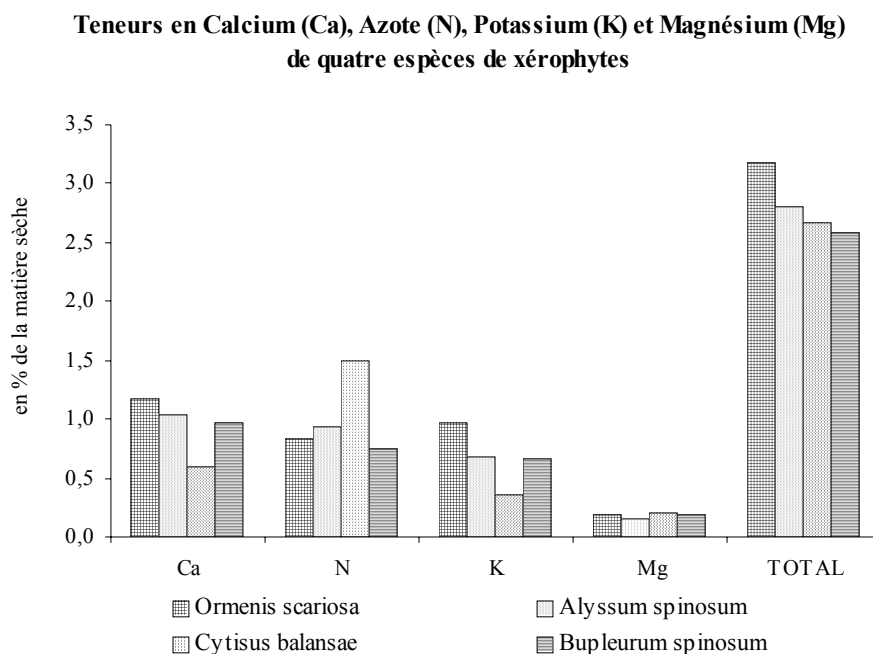


Figure 29

Parmi les quatre espèces, c'est *Ormenis scariosa* qui présente la plus forte concentration en éléments minéraux, les trois autres taxons présentant des teneurs assez voisines.

En terme de minéralomasse, la quantité d'azote stockée dans l'appareil épigé de cette formation xérophytique est estimée à 193 kg/ha, celle de calcium à 178 kg/ha, et celle du potassium et du magnésium respectivement à 123 kg/ha et 32 kg/ha.

Sur la zone d'étude, le stock de ces éléments minéraux mobilisés par les xérophytes est donc estimé à 526 kg/ha.

1.2.3. La minéralomasse du peuplement

L'importance quantitative de la minéralomasse des xérophytes est telle que dans la zone de plus faible recouvrement par le Thurifère, elle contribue à près de 60% de la minéralomasse totale du peuplement (Figure 30).

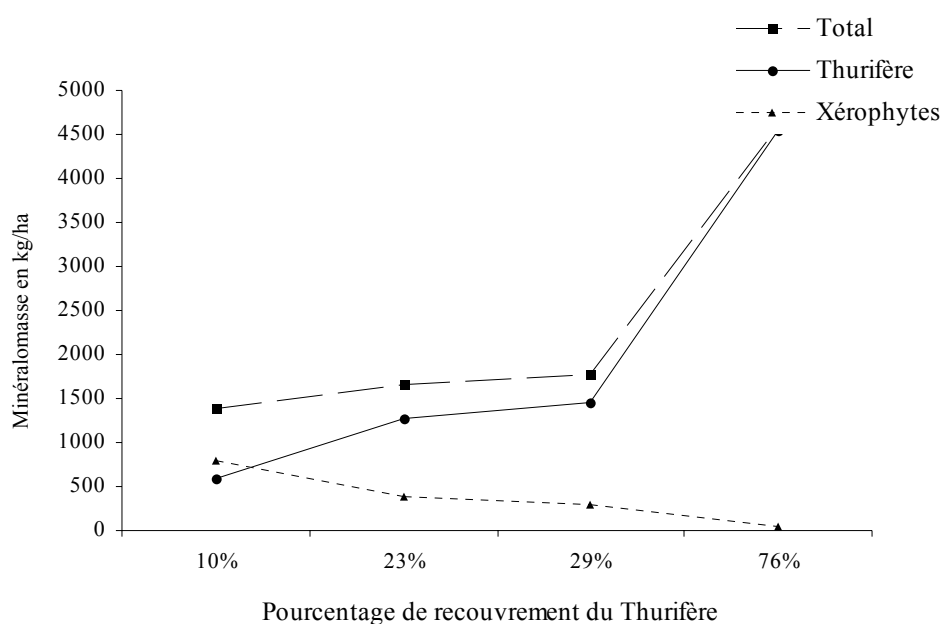


Figure 30: Minéralomasse du Thurifère et des xérophytes pour les différentes valeurs de densité de couvert

Sa contribution dans les zones à recouvrement intermédiaire par le Thurifère est plus faible, mais reste cependant relativement importante puisqu'elle représente environ 20% de la minéralomasse du genévrier. Dans les secteurs où le recouvrement par le Genévrier thurifère

est maximal (76%), les écarts entre la strate chaméphytique et la strate arborée sont importants, mais ne concernent qu'une surface réduite (17 ha).

Ainsi, globalement, dans notre site d'étude, il apparaît que la minéralomasse des xérophytes représente la moitié de celle du Thurifère, portant la minéralomasse totale à 1585 kg/ha.

La comparaison du stock d'éléments minéraux mobilisé par les Thurifères et les quatre espèces xérophytiques étudiées nous renseigne sur l'importance relative de ces différents taxons dans le cycle biogéochimique de cet écosystème.

Les genévriers thurifères du site étudié montrent un stockage du calcium très supérieur à celui des xérophytes, mais ceci principalement en raison de l'importance de la biomasse de cette espèce (Figure 31).

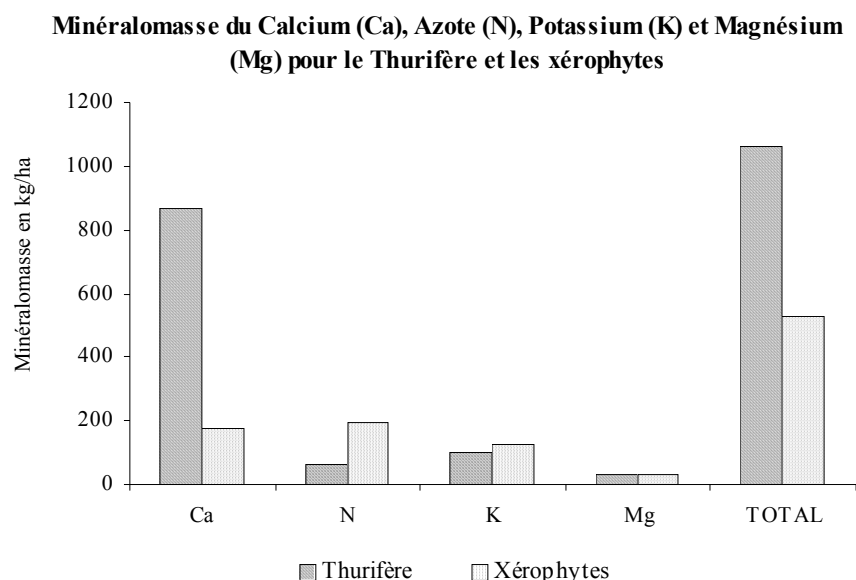


Figure 31

En revanche, pour l'azote ou le potassium, la minéralomasse est plus importante pour les xérophytes que pour le Thurifère. Ceci est lié au fait que pour le Thurifère, l'essentiel de la phytomasse est constitué par du bois, qui présente une très faible teneur en éléments minéraux. La minéralomasse du magnésium est quant à elle à peu près équivalente.

Ces valeurs apparaissent donc d'autant plus élevées que la phytomasse des xérophytes est très inférieure à celle du Genévrier thurifère. L'importance du stockage de l'azote et du potassium par ces chaméphytes semble conforter leur rôle majeur dans la régénération du peuplement.

En effet, nous avons vu précédemment les fortes teneurs de ces deux éléments, trouvées dans les cônes femelles. Ainsi, la présence des xérophytes assure la mobilisation et le recyclage de l'azote et du potassium dont pourra bénéficier ultérieurement le Thurifère, dans un milieu où les processus érosifs, en entraînant une partie des galbules, appauvrissent très certainement le sol en ces deux éléments.

Cet arbre présentant des germinations localisées soit sous la couronne des arbres, soit au sein des touffes de xérophytes (cf. "Les caractéristiques dendrométriques du peuplement", p. 57), il serait alors intéressant de déterminer précisément les besoins nutritifs d'une plantule de Thurifère pour les comparer à la composition minérale de la litière du Thurifère (Gauquelin *et al.*, 1992) et des xérophytes, afin d'apporter des informations supplémentaires susceptibles d'expliquer le déficit de régénération sexuée observé. Lepoutre (1961) remarque à ce sujet l'importance des rapports Ca/Mg et Mg/K échangeables dans les phénomènes de régénération du Cèdre dans le Moyen Atlas.

1.3. Conclusion

Les teneurs relatives en éléments minéraux des différents compartiments du Genévrier thurifère montrent que les concentrations les plus importantes se situent dans les feuilles, puis dans les rameaux et enfin dans les branches et les troncs, décrivant un gradient de concentration négatif du haut vers le bas de l'arbre. Dans ces compartiments, le calcium est toujours l'élément le plus représenté, suivi de l'azote, du potassium et du magnésium. Seules les galbules présentent un taux d'azote et de potassium supérieur au calcium, et supérieur à celui des autres compartiments (excepté les feuilles qui présentent une concentration en azote équivalente). Le potassium dont la mobilité est plus importante que celle des autres bioéléments étudiés semble donc illustrer les phénomènes de translocation interne, depuis les feuilles vers les galbules, les arbres femelles présentant des teneurs en potassium dans les feuilles supérieures aux mâles. Cet inversion de l'importance relative du calcium et du binôme azote-potassium entre l'appareil végétatif et les galbules peut être interprété comme une stratégie adaptative ayant pour conséquence de limiter la concurrence pour la nutrition minérale lors de la fructification, rejoignant les résultats précédents de phytomasse dans lesquels l'allocation d'énergie pour la production des cônes ne semblait pas désavantager les femelles.

En ce qui concerne les xérophytes, chez les quatre espèces étudiées, l'ordre d'importance des trois cations, Ca, K, et Mg, est identique. Seul l'azote présente des concentrations variables suivant les taxons, la teneur la plus forte étant observée chez *Cytisus balansae*, légumineuse fixatrice d'azote. La teneur en éléments minéraux d'*Ormenis scariosa* est la plus importante, celle d'*Alyssum spinosum*, *Cytisus balansae* et *Bupleurum spinosum* présentant des concentrations similaires.

La minéralomasse de ces bioéléments met en évidence l'importance à la fois quantitative et qualitative de l'azote et du potassium stocké par ces xérophytes, car leur forte représentativité dans les galbules du Thurifère laisse supposer le rôle majeur de ces éléments dans la régénération du peuplement, et donc le rôle majeur de ces chaméphytes dans le maintien des capacités nutritionnelles et reproductrices de cet écosystème.

La minéralomasse des xérophytes, qui représentent environ 50% de la minéralomasse totale du peuplement estimée à 1585 kg/ha, vient confirmer l'importance quantitative de ces chaméphytes. La régression des xérophytes et du Thurifère suite aux prélèvements de bois, induit donc une perte en éléments minéraux, accentuée par l'effet indirect de la réduction de la protection du sol par la couverture végétale, provoquant une perte en éléments minéraux du sol.

Pour pouvoir préciser les potentialités réelle de l'écosystème en terme de minéralomasse, ainsi que les transferts verticaux et horizontaux des bioéléments dans l'écosystème, il serait nécessaire de compléter ce travail par l'étude des éléments minéraux présents dans le sol, ainsi que par une approche plus précise de la répartition des bioéléments dans l'arbre en fonction de la hauteur de prélèvement, et de l'âge des individus.

RÉSUMÉ

La minéralomasse du peuplement

Minéralomasse du Genévrier thurifère:

- ✓ Troncs/branches, rameaux, feuilles: $\text{Ca} \gg \text{N} > \text{K} > \text{Mg}$
- ✓ Galbules: $\text{K} > \text{N} > \text{Ca} > \text{Mg}$
- ✓ Concentration en potassium dans les feuilles: $\varnothing > \odot$
- ✓ Concentration en éléments minéraux: Feuilles > Rameaux > Troncs/Branches
- ✓ Minéralomasse des Thurifères du peuplement:
 - ① Ca: 865 kg/ha
 - ① K: 98 kg/ha
 - ① N: 65 kg/ha
 - ① Mg: 32 kg/ha
 - ① Total: 1059 kg/ha

Minéralomasse des Xérophytes:

- ✓ *Ormenis scariosa*: $\text{Ca} > \text{K} > \text{N} > \text{Mg}$
- ✓ *Alyssum spinosum* et *Bupleurum spinosum*: $\text{Ca} > \text{N} > \text{K} > \text{Mg}$
- ✓ *Cytisus balansae*: $\text{N} > \text{Ca} > \text{K} > \text{Mg}$
- ✓ Fortes concentrations en azote et potassium
- ✓ Minéralomasse des xérophytes du peuplement:
 - ① N: 193 kg/ha
 - ① Ca: 178 kg/ha
 - ① K: 123 kg/ha
 - ① Mg: 32 kg/ha
 - ① Total: 526 kg/ha

Minéralomasse totale du peuplement:

$$\textcircled{1} \text{ N} + \text{Ca} + \text{K} + \text{Mg} = 1585 \text{ kg/ha}$$

2. DETERMINATION DU STOCK CARBONE AERIEN ET SOUTERRAIN DE LA VALLEE

Ce travail a pour but d'évaluer le réservoir carboné souterrain et aérien de cette formation à genévriers thurifères, afin d'apporter des précisions sur les potentialités de stockage du carbone des milieux méditerranéens d'altitude, peu étudiés de ce point de vue. A l'échelle mondiale, une meilleure compréhension des variations spatiales des stocks de carbone dans les différents écosystèmes devrait permettre de préciser le rôle de l'espèce forestière dominante (Nys *et al.*, 1994) et des facteurs climatiques, édaphiques et anthropiques sur la stabilisation du carbone dans le sol (Davidson & Lefebvre, 1993).

2.1. Stock carboné aérien

2.1.1. Méthodologie

2.1.1.1. Détermination de la teneur en carbone organique des échantillons

Pour accroître la précision des estimations de stock carboné, nous avons préféré doser la teneur en carbone dans les différents échantillons, plutôt que d'employer un taux de conversion arbitraire entre matière sèche et pourcentage de carbone souvent employé dans les études plus globales (Olson *et al.*, 1983).

Le stock carboné aérien a été déterminé sur les extraits pulvérulents, qui ont servi à l'étude de la minéralomasse des principaux bioéléments. L'échantillonnage a donc déjà été décrit dans le chapitre correspondant (page 103) et ne sera donc rappelé que succinctement:

L'étude de la teneur en carbone organique du Thurifère a donc été réalisée à partir de:

Troncs ou branches: 10 carottes prélevées à la tarière de Pressler, à une hauteur de 1,3 m.

Rameaux ($\odot < 2$ cm): 20 échantillons.

Feuillage: 20 échantillons

Galbules: 10 échantillons ont été prélevés, correspondant chacun à un groupe de galbules portés par le même rameau.

Quant à l'étude de la teneur en carbone organique des xérophytes, elle s'est basée sur: 10 échantillons (mélange représentatif de feuillage et de parties ligneuses) ont été récoltés sur chacune des 4 espèces (*Alyssum spinosum*, *Bupleurum spinosum*, *Ormenis scariosa*, *Cytisus balansae*).

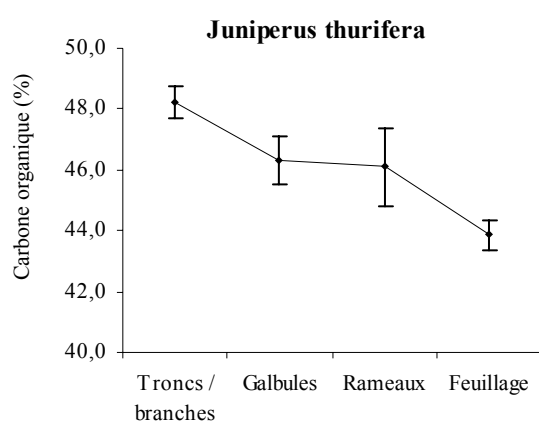
Le dosage du carbone a été effectué au carbographe NA 2100 pour les échantillons de troncs, rameaux et galbules du Thurifère, ainsi que pour les xérophytes, et par la méthode de la perte au feu pour le feuillage du Thurifère.

2.1.1.2. Conversion phytomasse $\rightarrow$ stock carboné

A partir des teneurs en carbone organique des échantillons, la détermination du stock carboné des xérophytes ou des différents compartiments du Genévrier thurifère a été réalisée en appliquant aux valeurs de phytomasse précédemment calculées, le pourcentage de carbone organique moyen calculé pour les différentes catégories d'échantillons.

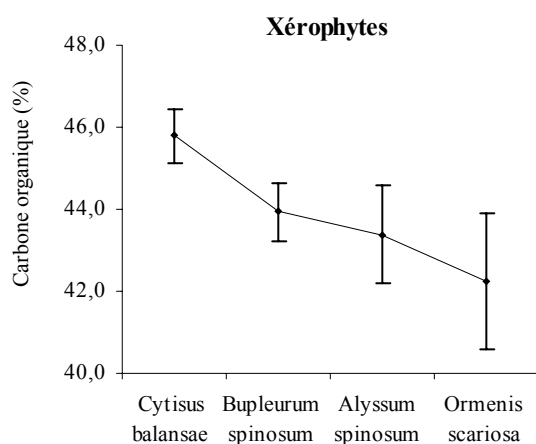
2.1.2. Résultats et discussion

2.1.2.1. Le pourcentage de carbone organique aérien



Dans le cas du Genévrier thurifère, le pourcentage de carbone organique ne montre pas de variations très importantes d'un compartiment de l'arbre à un autre, les valeurs s'échelonnant de $43,9 \pm 0,5\%$ à $48,2 \pm 0,5\%$. Le compartiment pour lequel le taux de carbone est le plus faible est celui du feuillage, en liaison avec l'abondance en éléments minéraux.

En effet, pour tous les compartiments, la teneur en carbone est inversement proportionnelle à la teneur en éléments minéraux.



Les pourcentages de carbone organique des quatre espèces xérophytiques sont relativement proches et varient de $42,2 \pm 1,7\%$ à $45,8 \pm 0,7\%$. En revanche, pour *Bupleurum spinosum* et *Cytisus balansae*, les teneurs en carbone organique ne sont pas inversement proportionnelles aux concentrations en éléments minéraux, ceci pouvant s'expliquer par d'éventuelles différences de concentration,

entre ces deux taxons, pour les éléments minéraux qui n'ont pas été dosés (P, Fe, Mn...).

2.1.2.2. Le stock carboné aérien

Le stock carboné de l'appareil épigé du Genévrier thurifère est estimé à 23 t/ha (cf. Tableau 15), et varie de 13 à 100 t/ha, suivant le pourcentage de recouvrement.

	Stock carboné aérien (t/ha) $\pm$ écart type	
	Genévrier thurifère	Xérophytes
Recouvrement par le thurifère: 10%	$12,8 \pm 0,8$	$12,8 \pm 0,3$
Recouvrement par le thurifère: 23%	$27,9 \pm 1,2$	$5,3 \pm 0,1$
Recouvrement par le thurifère: 29%	$32,1 \pm 1,2$	$4,9 \pm 0,1$
Recouvrement par le thurifère: 76%	$100,2 \pm 4,3$	$0,8 \pm 0,01$
Thuriféraie totale	$23,3 \pm 1,1$	$8,1 \pm 0,2$

Tableau 15: Stock carboné aérien de la Thuriféraie

Dans les secteurs où la densité du couvert arboré est la plus faible, l'ensemble des xérophytes stocke une quantité de carbone identique aux thurifères, soit 12,8 t/ha. En moyenne, cette

strate de petits ligneux est ainsi capable de stocker 8 tonnes de carbone par hectare, soit le quart du stock carboné total du peuplement, lequel est estimé à environ 31 t/ha.

Si l'on compare cette valeur aux stocks carbonés proposés par Olson *et al.* (1983) pour différents écosystèmes (Figure 32), il apparaît que cette formation méditerranéenne de haute montagne présente un stock carboné légèrement inférieur à celui de la "forêt ouverte d'altitude", définie par ces auteurs comme une forêt clairsemée, à genévriers et/ou pins. Nos données permettent donc de préciser, localement, les valeurs données par Olson *et al.* (1983), basées sur un petit nombre d'études. Sur la Figure 32, on peut noter que ces forêts ouvertes d'altitude définies par ces auteurs, de même que les forêts méditerranéennes, sont des écosystèmes qui présentent une relativement faible capacité de stockage du carbone. Or, ces formations (associées à certaines formations arbustives, notamment à *Acacia aneura* et *Eucalyptus* d'Australie) coloniseraient une superficie estimée à environ 4 à 5% de celle des écosystèmes arborés à l'échelle mondiale, représentant ainsi un stock carboné d'environ 10×10^9 t (soit 2% du stock carboné total des écosystèmes arborés).

Ces observations soulignent donc la place non négligeable de ces forêts ouvertes d'altitude dans le stock carboné aérien des écosystèmes arborés, et également l'importance d'obtenir, sur ces milieux peu étudiés de ce point de vue, des données précises susceptibles d'améliorer les estimations de stock carboné à l'échelle mondiale.

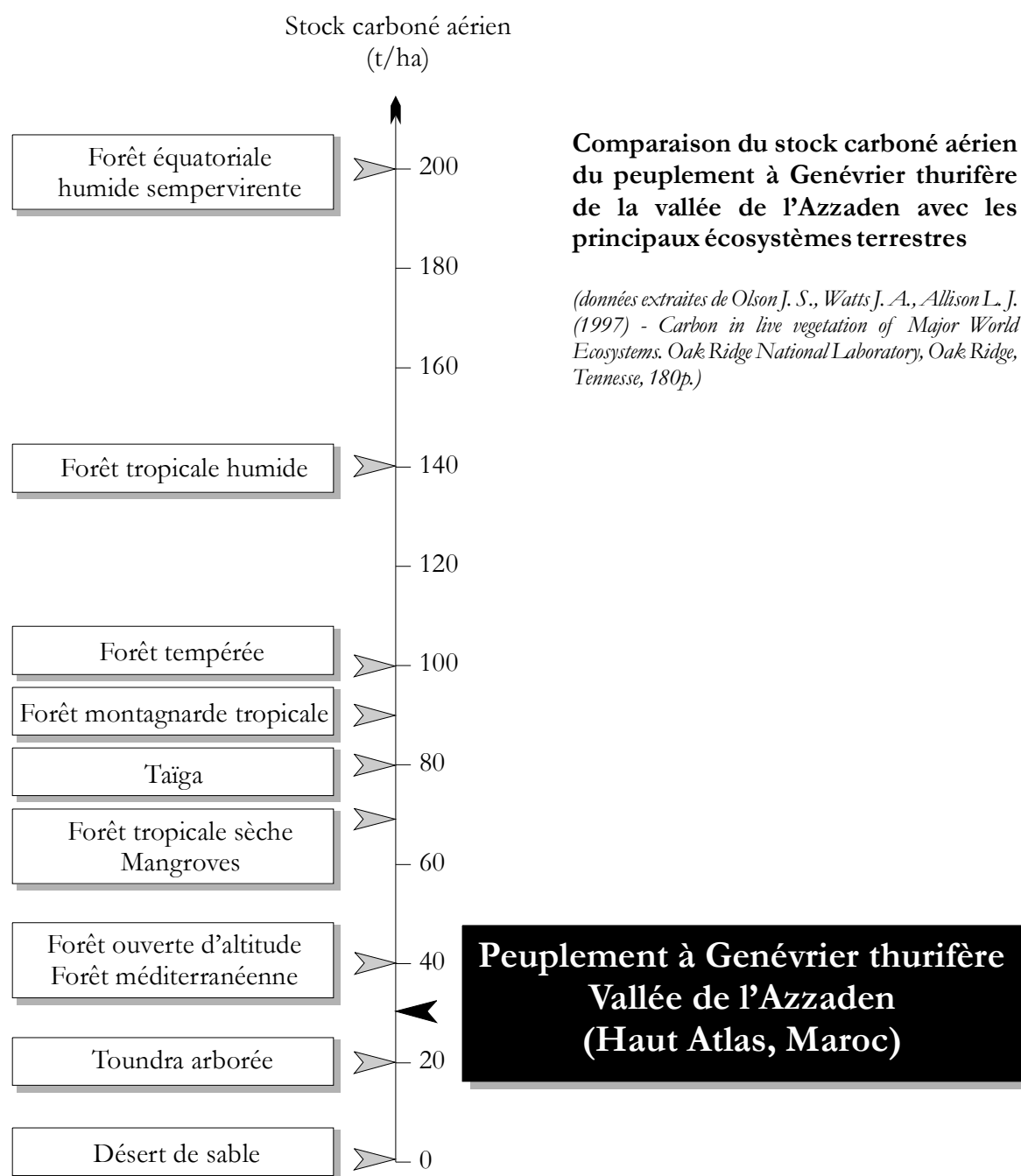


Figure 32

2.2. Stock carboné souterrain

Dans la haute montagne méditerranéenne, l'occupation humaine et la dégradation qui l'accompagne, ont provoqué une érosion des sols forestiers, menaçant l'avenir des phytocénoses d'altitudes, notamment à travers les problèmes de régénération, abordés précédemment. Par effet de feed-back, la pédogenèse dans ces écosystèmes altimontains est elle-même menacée par l'insuffisance de la couverture végétale limitée aux espèces ligneuses. Cette étude vise donc d'une part à déterminer le stock carboné de ces sols de haute montagne, et d'autre part à évaluer la contribution du Genévrier thurifère dans l'enrichissement en carbone organique des niveaux superficiels. Enfin, ceci s'inscrit dans l'optique d'une meilleure connaissance du stock carboné souterrain des formations méditerranéennes d'altitude.

2.2.1. Méthodologie

2.2.1.1. Échantillonnage

En formulant l'hypothèse que le pourcentage de carbone dans le sol pouvait être lié à la densité du couvert, comme cela a déjà été montré dans les milieux steppiques (Bottner, 1982; Le Houérou, 1986; Gauquelin *et al.*, 1996), nous avons réalisé notre échantillonnage dans les placettes ayant servies à l'étude de la phytomasse.

Dans chacune des quatre zones de recouvrement par le Thurifère, quatre profils hors du couvert des arbres et quatre profils sous-couvert ont été réalisés.

Pour chaque profil, les prélèvements ont été effectués par tranches superposées de cinq centimètres de profondeur, sans tenir compte d'éventuels horizons pédologiques (Gauquelin & Baudière, 1981). En effet, dans ces formations altimontaines, la limite entre les différents horizons est rarement discernable, notamment lorsque l'on s'écarte du couvert des arbres. En outre, cette méthode permet une comparaison rigoureuse des différents profils (Gauquelin, 1985), et a déjà été utilisée de manière concluante dans des études antérieures (Baudière & Serve, 1971; Fromard, 1978; Gauquelin, 1985; Gauquelin & Dagnac, 1988).

Lorsque cela a été possible, les échantillons ont été extraits selon la technique du cylindre de densité. Nous avons limité la profondeur de prélèvement à 35 cm, car au-delà de cette profondeur:

- le taux de carbone organique est très faible

- l'omniprésence de très nombreux blocs rocheux rend impossible tout prélèvement au cylindre et donc ne permet pas la détermination de la densité apparente.

Lorsque aucun prélèvement en profondeur n'a pu être réalisé, dû au pourcentage trop élevé de cailloux, nous avons considéré que le taux de carbone était nul.

L'estimation du stock carboné souterrain imputable aux racines du Thurifère n'a pu être conduite, du fait des difficultés méthodologiques liées au type d'enracinement de cet arbre. De même, nous n'avons pas réalisé de prélèvements sous les touffes des xérophytes. Les valeurs proposées du stock carboné souterrain sont donc des valeurs par défaut.

2.2.1.2. Dosage du carbone organique du sol

Parmi les nombreuses techniques de dosage du carbone organique (Tiessen & Moir, 1993), nous avons choisi la méthode Anne (modifiée O.R.S.T.O.M) d'oxydation à chaud d'une prise d'essai (Aubert, 1970), dont le poids varie suivant la teneur en carbone estimée dans l'échantillon (de 0,1g à 5g).

2.2.1.3. Estimation du stock carboné du sol

A partir des prélèvements effectués au cylindre (volume de 250 ml), nous avons pu déterminer la densité apparente du sol à différentes profondeurs (Carter, 1993) d'après la formule:

$$\text{Densité apparente (g/l)} = \text{poids sec de l'échantillon (g)} / \text{volume du cylindre (l)}$$

Cette valeur de densité apparente associée aux résultats du pourcentage de carbone du sol a permis d'estimer le stock carboné par horizons (exprimé en t/ha).

La densité apparente des échantillons variant en fonction de la profondeur de prélèvement, nous avons choisi de calculer la densité moyenne de chaque horizon. Partant du constat que cette hétérogénéité est due avant tout aux fortes différences observées dans les pourcentages d'éléments grossiers, nous avons été conduit à calculer séparément la densité de la terre fine et celle des cailloux.

La densité des cailloux a été déterminée sur 10 échantillons, après avoir estimé leur volume par immersion. La roche mère étant la même dans tous les profils, cette densité a été appliquée à tous les échantillons. Dans le cas des prélèvements au cylindre, nous avons ensuite calculé le pourcentage volumique des cailloux dans l'échantillon. Par différence, nous avons pu alors déterminer pour la terre fine, son volume dans l'échantillon et donc sa densité apparente.

Ensuite, pour tous les échantillons non prélevés au cylindre, nous avons appliqué la densité moyenne de la terre fine et des cailloux obtenue pour chacun des horizons.

Cette méthode présente l'avantage de tenir compte, pour tous les échantillons, de la proportion d'éléments grossiers, ainsi que de la profondeur de prélèvement, l'écart type portant ainsi sur des unités beaucoup plus homogènes et s'en trouvant donc grandement diminué. Nous verrons en effet qu'en fonction de la profondeur ou de la présence ou non d'une couverture arborée, les densités apparentes peuvent être très variables, bien que certains auteurs, notamment McDaniel (1992) qui a travaillé sur des milieux similaires dans les formations mixtes Pins-Genévriers dans l'ouest des USA, n'en tiennent pas compte et optent pour une densité moyenne.

2.2.1.4. Une autre méthode d'estimation du carbone organique: la formule de "Cabidoche" modifiée

Les estimations de stock carboné passant par la méthode précédente ont nécessité la détermination de la densité apparente du sol. Or, l'emploi d'un cylindre de densité dans ces sols de la haute montagne méditerranéenne n'est pas toujours aisé et génère souvent une incertitude plus ou moins forte dans l'estimation finale du stock carboné. En effet, les phénomènes de compression sur les bords du cylindre (Carter, 1993), sont une source d'erreur négligeable en comparaison des deux types de surestimations que l'on rencontre inévitablement lors de l'échantillonnage de sols caillouteux:

Seuls les profils les moins caillouteux sont échantillonnés, ce qui induit un biais dans la représentativité de l'échantillonnage.

Au sein d'un même profil, la présence de gros blocs rocheux conduit à prélever des échantillons dans lesquels la taille des pierres ne dépasse pas le diamètre du cylindre

Enfin, un autre biais est introduit lorsqu'en profondeur, l'abondance de cailloux empêche tout prélèvement au cylindre, conduisant cette fois à une estimation par défaut.

Nous nous sommes donc intéressés aux travaux de Cabidoche (1979), qui a tenté de s'affranchir des prélèvements au cylindre en élaborant une formule basée sur le principe selon lequel la densité apparente du sol est une fonction théorique hyperbolique de la teneur en matière organique. Il propose donc une estimation de la quantité de matière organique à partir de la formule suivante:

$$S_{(t/ha)} = \frac{X.E.(100 - C)}{0,57 + 0,067 X} \times 10^{-2}$$

- Où:
- S : quantité de matière organique exprimée en t/ha
 - X : teneur en matière organique (en % de la terre fine)
 - E : épaisseur du sol (en cm)
 - C : pierrosité estimée (en % du volume du sol)

Sur cette base, nous proposons une méthode mixte basée sur l'utilisation du cylindre pour les échantillons peu caillouteux et sur l'utilisation de la formule de Cabidoche pour ceux présentant une pierrosité élevée.

Selon Dobremez (1979), dans une étude menée sur la teneur en carbone organique des sols himalayens, cette marge d'erreur est évaluée à 20%. Nous avons donc augmenté la précision de la formule précédente en remplaçant la pierrosité estimée par la mesure précise du volume de cailloux à partir des mesures de densité de la roche mère (cf. Tableau 16). Cette densité estimée, la détermination du volume de cailloux se fait par simple pesée des éléments grossiers présents dans l'échantillon. Le passage au pourcentage volumique requiert quant à lui la détermination de la densité de la terre fine. Celle-ci est obtenue par des prélèvements au cylindre dans des sols moins caillouteux, en soustrayant au volume du cylindre le volume des pierres.

Enfin, pour obtenir une estimation du stock carboné, nous avons remplacé dans l'équation, le pourcentage de matière organique dans la terre fine par la teneur en carbone organique en utilisant la relation: Teneur en M.O. = % Carbone organique $\times 1,72$.

Cette méthode permet donc de prendre en considération des blocs rocheux d'une taille supérieure à celle du cylindre, et dans le cas d'éléments beaucoup plus gros, d'estimer sur place leur volume. Elle permet en outre de mesurer la densité apparente du sol pour chaque échantillon.

La comparaison des résultats obtenus par les prélèvements au cylindre et ceux obtenus par la formule de Cabidoche sont représentés sur la Figure 33

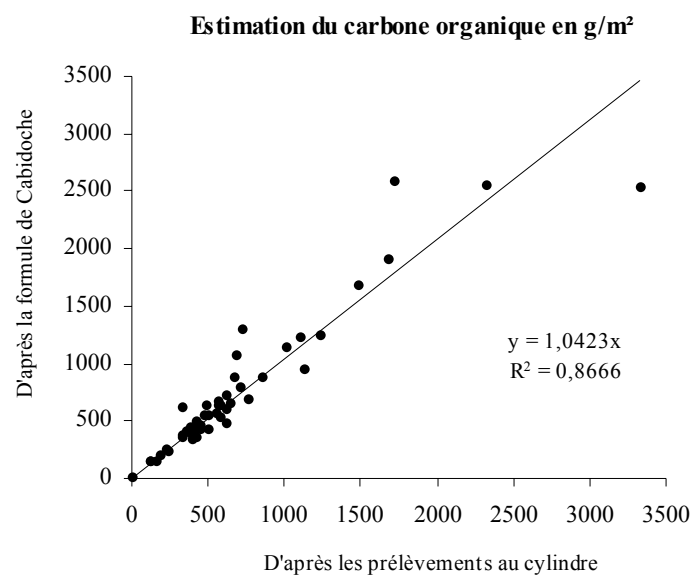


Figure 33

On peut remarquer que le coefficient de détermination est relativement élevé, mais surtout que la formule de l'équation linéaire est proche de l'égalité des termes x et y. Cette méthode apparaît donc fiable pour estimer le stock carboné d'un sol, et associée à la technique du cylindre de densité devrait permettre de s'affranchir du biais systématique inhérent à l'emploi du cylindre dans des milieux à forte pierrosité.

2.2.2. Résultats et discussion

2.2.2.1. Caractéristiques édaphiques des sols de la Thuriféraie de l'Azzaden

Avant d'étudier le stock carboné proprement dit, nous nous sommes tout d'abord intéressé aux principales caractéristiques édaphiques de ce peuplement, ainsi qu'à d'éventuelles différences entre profils hors couvert et profils sous couvert à travers l'étude du pH.

À l'image de la plupart des groupements forestiers pré-steppiques du bassin méditerranéen, le sol de cette petite vallée du Haut Atlas est peu évolué, et comme le souligne Barbero *et al.* (1990b) pour ce type de milieu, souvent tronqué en surface.

Reposant principalement sur des schistes, avec dans la partie basse de la vallée, des affleurements de grès rouges du permotrias (Proust, 1973), le substrat est acide, et le sol superficiel (profondeur moyenne d'environ 40 cm) présente un pourcentage de cailloux élevé (environ 50%). Pour la description des principales caractéristiques édaphiques, nous reprendrons les données de Gauquelin & Dagnac (1988) que nous compléterons par des données nouvelles concernant le pourcentage de carbone et le pH.

Le type d'humus qui caractérise les secteurs sous couvert est considéré comme peu évolué, la sécheresse estivale, par ralentissement de la décomposition de la matière organique, lui conférant un caractère xérique le rapprochant des xéromor ou xéromoder. L'humification est relativement lente, le C/N étant compris entre 15 et 20, tandis que dans les secteurs hors couvert, il est compris entre 10 et 15 en liaison avec la faible quantité de matière organique.

Dans les niveaux superficiels sous le couvert des arbres (0-10 cm), nous avons trouvé des pourcentages de carbone organique dans la fraction de terre fine (fraction < 2mm) d'environ 7%, valeurs voisines de celles enregistrées dans les thuriférais espagnoles par Velasco & Del Rio (1977) dans la région de Ségovie (7,3 à 7,5%), ou par Velasco & Albadera (1966) dans la région de Guadalajara (8,9%). Au sein des 14 thuriférais marocaines étudiées par Gauquelin & Dagnac (1988), ce taux varie de 0,4% pour les peuplements les plus dégradés (Zaouiat Ahansal, Haut Atlas Central) à 27% pour les formations les plus préservées, les sols de la vallée de l'Azzaden présentant donc des valeurs moyennes.

Hors couvert, ce pourcentage de carbone est d'environ 2%, valeurs voisines de celles mesurées par Gauquelin & Dagnac (1988) sur les 14 formations précédemment évoquées (0,3 à 6%).

Dans les niveaux superficiels (0-5 cm et 5-10 cm), sous couvert les pourcentages respectifs des argiles et du sable sont de 34% et 14%, hors couvert le taux d'argile diminuant au profit des éléments plus grossiers (21% d'argile et 50% de sable).

Concernant le complexe absorbant, sous couvert, la capacité d'échange est importante (entre 35 et 70 meq/100g), le taux de saturation étant fréquemment proche des 100%. Dans les zones inter-canopées, les potentialités trophiques sont plus réduites, la capacité d'échange étant cependant d'environ 20 meq/100g, pour un taux de saturation d'environ 75%.

L'acidité du sol (pH eau) a été mesurée, par la méthode électrométrique à électrode de verre, sur une suspension de 20g de terre fine dans un volume de 50 ml d'eau (Baize, 1988).

La comparaison des profils sous couvert et hors couvert (Figure 34) met en évidence qu'à une exception près, quel que soit le recouvrement du Genévrier thurifère, les pH des profils effectués en dehors de la zone d'influence de la couronne de l'arbre sont systématiquement inférieurs à ceux des profils réalisés sous le houppier.

Ainsi, les valeurs moyennes de pH calculées pour chacun des recouvrements nous indiquent que sous couvert et quel que soit la profondeur, le pH est toujours supérieur ou égal à 7 (pH moyen de 7,5), alors dans les secteurs hors couvert, il ne dépasse jamais ou qu'exceptionnellement cette valeur (pH moyen de 6,5). De même, sur les courbes moyennes, on peut noter que les variations entre les différentes zones de recouvrement sont atténuées dans les profils sous couvert.

Ces résultats rejoignent ceux obtenus par Gauquelin & Dagnac (1988), qui sur des prélèvements effectués dans quatorze stations à genévriers thurifères du Maroc (Haut Atlas Occidental, Haut Atlas Central, Haut Atlas Oriental et Moyen Atlas), ont mesuré des pH sous le couvert des arbres (niveaux 0-5 cm et 5-10 cm) toujours compris entre 7 et 8, dans un milieu où le pH hors couvert variait de 5,3 à 8,2.

Lemoine-Sébastien en 1965 notait également pour trois prélèvements effectués sous le couvert de ces genévriers, entre 2000 et 2270 m (l'un à Aguelmame Sidi-Ali dans le Moyen Atlas, les deux autres au col du Tichka dans le Haut Atlas Central), des pH variant de 7,2 à 7,5.

Valeurs de pH dans le sol en fonction du degré de recouvrement par le thurifère dans deux types de profils: profils sous le couvert de l'arbre et profils hors du couvert

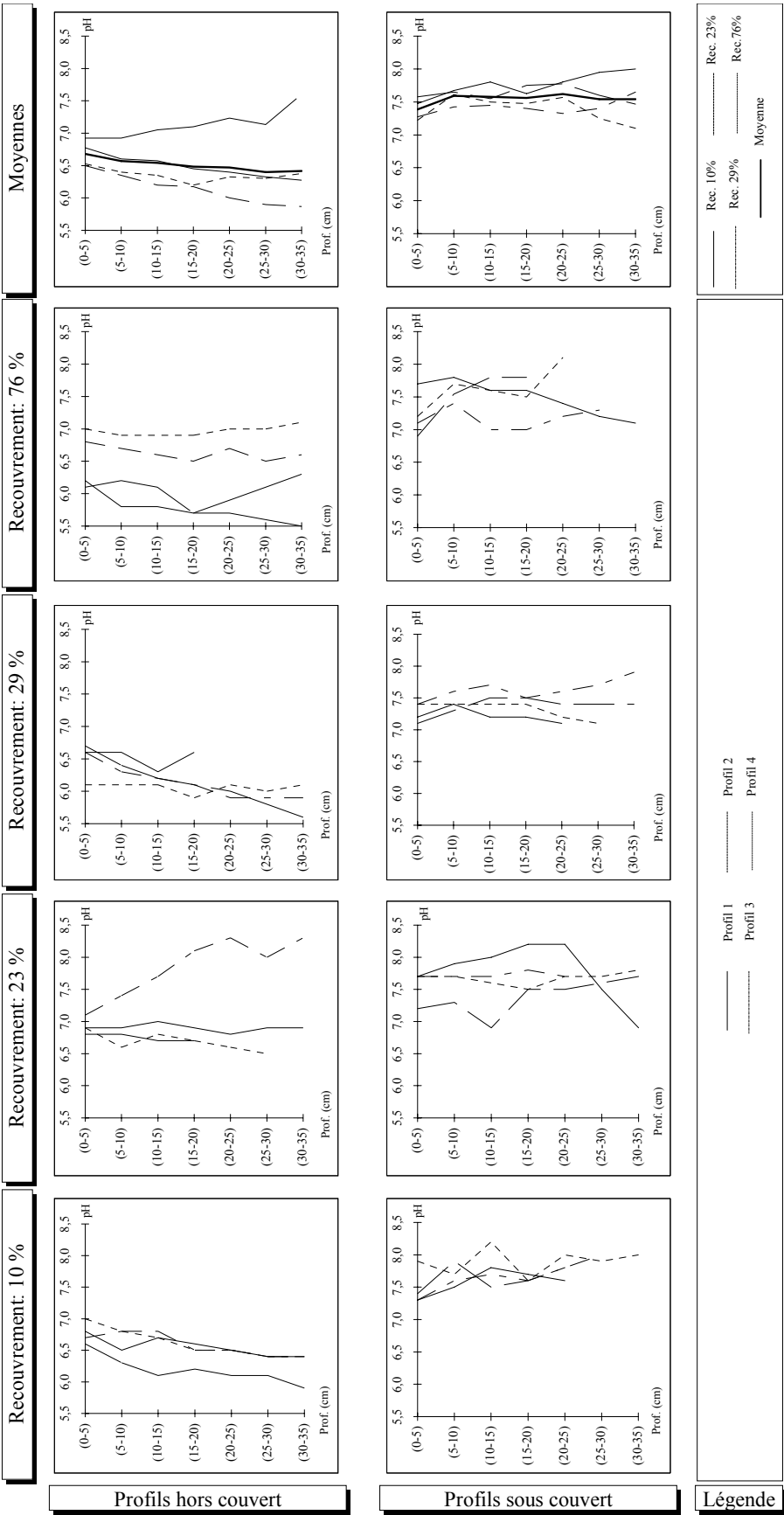


Figure 34

Quel que soit la nature de la roche mère, et par conséquent l'acidité du sol, l'influence du couvert de l'arbre sur le pH se manifeste toujours par des valeurs comprises entre 7 et 8. Les résultats obtenus par Gauquelin & Dagnac (1988) sur les dix premiers centimètres de sol peuvent donc être étendus à l'ensemble du profil, puisque même en profondeur nous avons trouvé un pH stable alors que sous couvert, il a tendance à diminuer. Selon Gauquelin *et al.* (1992 et 1998), cette évolution du pH serait à mettre en relation avec l'importance des éléments minéraux restitués au sol via la litière (riche en calcium) et les pluvioléssivats.

Le rôle du houppier dans la modification de l'acidité du sol a été également mis en évidence par Davenport *et al.* (1996) sur *Juniperus monosperma* (Los Alamos, USA), mais à l'inverse du Genévrier thurifère, ces auteurs ont pu montrer que les chutes de litière de ce taxon provoquaient une acidification des horizons superficiels (passage d'un pH de 7,5 à un pH de 6).

Développés principalement sur des schistes, les sols de la vallée de l'Azzaden présentent donc un pH légèrement acide (6,5), auquel le Genévrier thurifère est indifférent. Ce taxon est en effet présent sur tous les types de sols, que ce soit sur gypses, gneiss ou calcaires en Espagne (Braun-Blanquet & De Bolos, 1957 ; Velasco & Albadera, 1966; Durrieu, 1967; Rivas-Martinez, 1969; Velasco & Del Rio, 1977; Costa Tenorio *et al.*, 1987 et 1996), sur schistes, grès rouges ou calcaires au Maroc (Emberger, 1939; Lemoine-Sébastien, 1965; Gauquelin & Dagnac, 1988) ou encore sur calcaires, silice, granites ou gneiss en France et en Corse (Escarel, 1952; De Litardière, 1956; Conrad, 1986; Bontzolakis-Bouhia, 1993).

D'une profondeur moyenne de 40 cm, ces sols superficiels, généralement fortement érodés, que Lemoine-Sébastien (1965) qualifie de "structure oropédique", sont caractéristiques de la plupart des thuriferaies marocaines, mais se rencontrent également dans d'autres stations de son aire de répartition, notamment dans les "Monegros" en Espagne, où ces sols squelettiques sont fréquents (Durrieu, 1967).

2.2.2.2. La densité apparente du sol

La densité apparente du sol, mesurée indépendamment pour les deux groupes d'échantillons (hors couvert et sous couvert), ainsi que pour les différentes profondeurs (cf. Tableau 16), met en évidence une tendance générale allant vers une augmentation de la densité du sol avec la profondeur. Cette variation étant moins sensible sur la fraction terre fine que sur le sol, cette

augmentation est à mettre en relation avec le pourcentage de terre fine qui va en décroissant de la surface vers les horizons profonds.

	Densité de la roche-mère (g/l)	Pourcentage de terre fine (<2 mm)	Densité apparente de la terre fine (g/l)	Densité apparente du sol (g/l)
Secteur hors couvert				
0-5 cm	2533 (95)	57 (14)	881 (212)	1262 (122)
05-10 cm	2533 (95)	54 (13)	837 (225)	1294 (202)
10-15 cm	2533 (95)	52 (17)	937 (93)	1302 (95)
15-20 cm	2533 (95)	49 (13)	878 (136)	1337 (232)
20-25 cm	2533 (95)	45 (17)	906	1484
25-30 cm	2533 (95)	43 (18)	898	1458
30-35 cm	2533 (95)	47 (22)	887 (248)	1437 (253)
Moyenne		47 (20)	889 (86)	1368 (87)
Secteur sous couvert				
0-5 cm	2533 (95)	54 (16)	650 (144)	1099 (205)
05-10 cm	2533 (95)	55 (21)	601 (289)	1077 (316)
10-15 cm	2533 (95)	55 (18)	809 (319)	1125 (350)
15-20 cm	2533 (95)	55 (18)	818 (134)	1114 (71)
20-25 cm	2533 (95)	48 (15)	622	1185
25-30 cm	2533 (95)	42 (13)	725	1188
30-35 cm	2533 (95)	40 (15)	801	1192
Moyenne		51 (17)	718 (118)	1140 (130)

() Écart type

Tableau 16

La densité apparente moyenne de la terre fine ainsi que celle du sol sont toujours inférieures dans les prélèvements réalisés sous couvert. Ces différences de densités hors et sous couvert sont fréquentes dans ces formations ouvertes des milieux semi-arides à l'exemple des peuplements mixtes de Pins et de Genévriers (*J. monosperma* (Engelm.) Sarg., *J. occidentalis* var. *occidentalis* Hook., *J. occidentalis* var. *australis* Vasek, *J. osteosperma* (Torr.) Little, *J. scopulorum* Sarg., *J. deppeana* Steudel, et *J. coahuilensis* (Mart.) Gaus.) du nord-ouest de l'Amérique (Chambers *et al.*, 1999). Les faibles densités apparentes des couches superficielles du sol sous couvert sont liées à l'existence d'une couche de litière et d'un manteau humifère. A l'extérieur de la zone d'influence du houppier, les processus érosifs semblent donc avoir

décapés ces horizons de surface, qui en tout état de cause ne devraient pas être présents sur toute la surface de ces formations pré-steppiques. En outre, il est à noter que les densités apparentes sont plus homogènes hors couvert que sous couvert, comme en témoignent les écart types. En revanche, hormis pour le niveau 0-5 cm, il n'y a pas de différence significative dans le pourcentage moyen de terre fine entre ces deux catégories de profils.

2.2.2.3. Le pourcentage de carbone organique dans le sol

Le carbone organique hors couvert:

L'étude des courbes moyennes de répartition du carbone organique en profondeur met en évidence une répartition homogène du carbone dans les profils (cf. Figure 35). Ainsi par exemple, la zone à faible recouvrement par le Thurifère présente des taux de carbone organiques aussi forts pour le niveau 30-35 cm (0,63 %) que pour le niveau 0-5 cm (0,66 %). Contrairement à ce qu'avance Bottner (1982) pour les steppes méditerranéennes, cet isohumisme ne semble pas ici, lié à la production de matière organique par l'appareil racinaire des végétaux, car les herbacées dont la rhizosphère est abondante, sont pratiquement absentes hors du couvert des arbres, et la rhizosphère des xérophytes épineux se résume le plus souvent à un simple pivot.

Pour expliquer cet isohumisme, on peut en revanche avancer l'hypothèse qu'aux basses altitudes, la proximité des villages induit une intense dégradation de la couronne des arbres, à laquelle peut s'ajouter un décapage des niveaux superficiels du sol par le pâturage et le piétinement des nombreux troupeaux de caprins comme cela a été observé dans certaines Thuriféraires espagnoles (Bertrand & Bertrand, 1999). Ce processus est ensuite entretenu par l'érosion éolienne et le ruissellement parfois important sur ces fortes pentes.

Plus haut, les phénomènes périglaciaires s'intensifient avec la baisse de la température, et participent ainsi à la déstructuration du sol et son remaniement, prenant le relais d'une pression anthropique décroissante. Il faut cependant noter qu'à la limite supérieure du peuplement, les taux de carbone organique sont relativement élevés, probablement en liaison avec l'importance de la strate chaméphytique (recouvrement de 50%) qui représente à la fois une source non négligeable de carbone organique (cf. chapitre "stock carboné aérien"), et une protection contre l'érosion et l'instabilité des versants, mais aussi du fait de l'aggravation des conditions climatiques rendant la décomposition de la matière organique plus difficile.

Les profils de carbone organique sous couvert:

Les pourcentages de carbone dans les niveaux superficiels des échantillons prélevés sous la couronne des arbres sont relativement élevés (cf. Figure 35), compte tenu de la dégradation du milieu.

Outre la taille considérable des couronnes des arbres au Maroc, cette concentration du carbone organique dans le sol semble due à des phénomènes de minéralisation très lents, liés aux basses températures hivernales et à la xéricité estivale, caractéristiques de ce type de phytocénose méditerranéenne d'altitude, ainsi qu'à une production de litière importante (Gauquelin *et al.*, 1992 & 1998). Cependant, même si le turn-over de la matière organique est lent, il ne faut pas sous estimer la productivité de cet écosystème.

Pour tous les profils, nous remarquons également un gradient de concentration négatif de la surface vers les niveaux profonds, beaucoup plus marqués que dans les profils hors couvert. Ainsi que certains auteurs ont pu le montrer (Baudière & Serve, 1971; Gauquelin & Baudière, 1981) cet appauvrissement en profondeur illustre, par opposition aux profils hors couvert, une situation "d'équilibre" dynamique ou biostasie, dans lequel la minéralisation des substances organiques se réalise "in situ".

Pourcentage de carbone dans le sol en fonction du degré de recouvrement par le thurifère dans deux types de profils: profils sous le couvert et profils hors du couvert

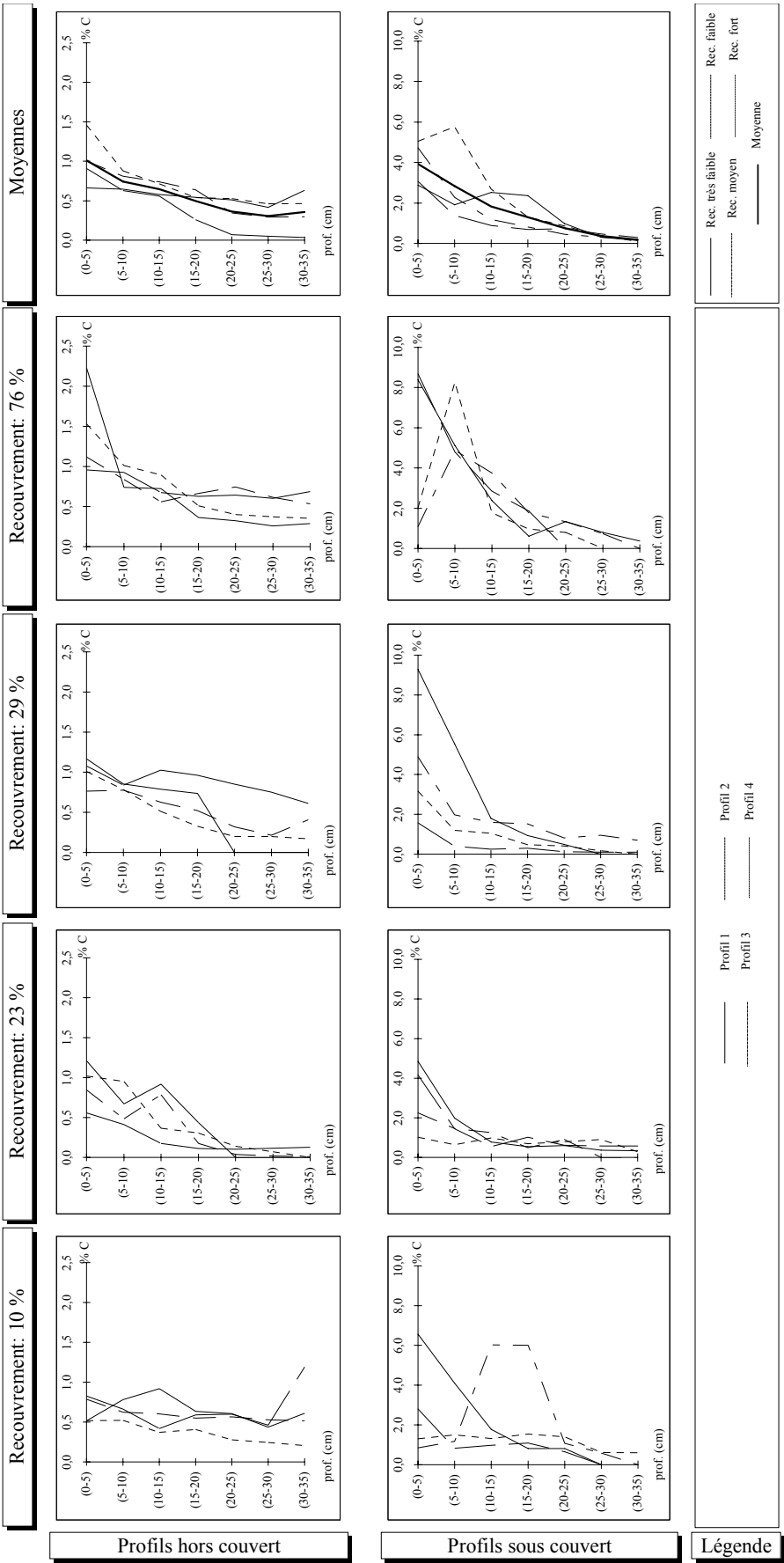


Figure 35

Comparaison des profils hors couvert et sous couvert:

La comparaison des résultats entre les profils sous couvert et hors couvert montre l'importance de la présence de l'arbre sur la teneur en carbone organique dans les niveaux superficiels (0-5 et 5-10 cm). Les teneurs sous couvert sont de 4 à 7 fois plus élevées que celles observées hors couvert, respectivement pour les horizons 5-10 et 0-5 cm. Ainsi, les valeurs de carbone organique hors couvert de l'horizon de surface correspondent à celles de l'horizon 15-20 cm des profils sous couvert. Au-delà de 20 cm, les taux de carbone diminuent progressivement et les valeurs obtenues pour ces deux types de profils convergent.

Cette forte différence entre ces deux types de profils est révélatrice des conditions pédogénétique particulières qui règnent sous la couronne des arbres et confirme la notion de microédaphisme déjà mise en évidence dans ces formations par d'autres auteurs (Gauquelin & Dagnac, 1988; Gauquelin *et al.*, 1998a), et illustrée sur la Figure 36.

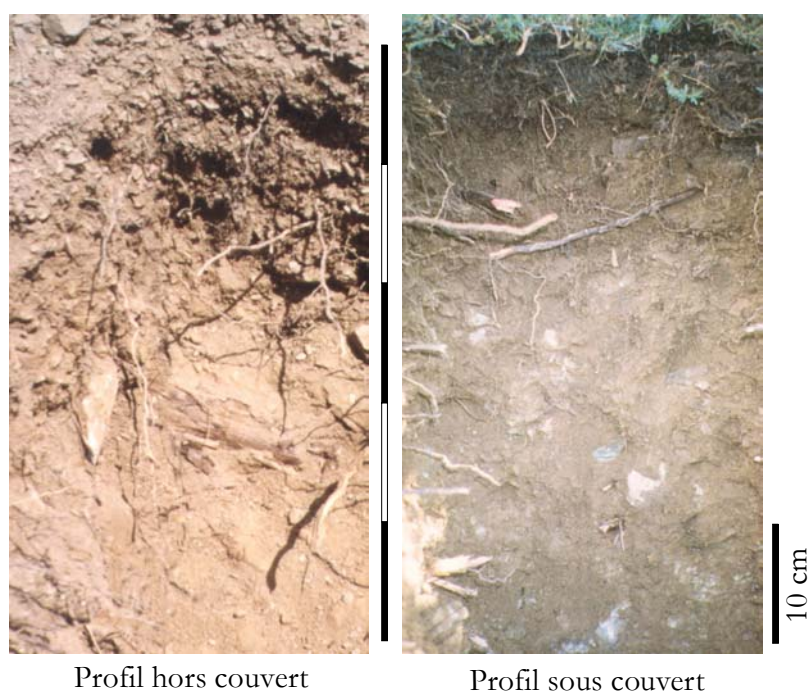


Figure 36

L'étude des courbes moyennes de chaque zone de recouvrement nous révèle que le pourcentage de carbone organique moyen sous couvert, évolue avec le pourcentage de

recouvrement par le Thurifère, à l'exception de la zone de très faible recouvrement. On peut donc penser que dans les secteurs à forte densité d'arbres, d'une part les chutes de litières par individus sont plus importantes, ce que conforte les résultats de phytomasse précédemment décrits et dans lesquels nous avons montré que les arbres de ces zones à fort recouvrement sont généralement plus gros, et d'autre part, l'érosion du manteau humifère est atténuée.

Cette tendance rejoint les observations de Gauquelin (1988) sur d'autres thuriféraires marocaines, ainsi que celles de McDaniel & Graham (1992) sur une formation mixte de *Pinus edulis* Engelm. et *Juniperus osteosperma* (Torr.) Little, dans l'État de l'Utah (USA).

Dans le cas des profils hors couvert, la même tendance apparaît. Ainsi, les arbres exerceraient une influence même dans les zones "inter-canopées". On peut alors évoquer plusieurs hypothèses expliquant ce phénomène:

- Les processus érosifs sur ces fortes pentes pourraient être responsables d'une redistribution horizontale du carbone organique, les zones hors couvert bénéficiant de l'apport de matériau humique des arbres voisins comme cela est évoqué par Wilcox (1994) dans une formation mixte Pins-Genévriers en milieu semi-aride (Nouveau Mexique, USA).
- Le lien entre le recouvrement et le carbone organique pourrait être attribué à la présence plus ou moins lointaine d'individus aujourd'hui disparus du fait d'une utilisation intense du milieu, les taux de carbone organique actuels étant le reflet d'une végétation passée ayant laissée dans le sol l'empreinte d'un peuplement jadis plus dense. C'est cette même hypothèse que certains auteurs ont retenue pour expliquer les fortes teneurs en carbone organique de certaines formations steppiques (Gauquelin *et al.*, 1998b).

On peut écarter l'hypothèse d'un enrichissement en carbone organique par les xérophytes car, comme nous l'avons vu dans le chapitre "Estimation de la phytomasse des xérophytes épineuses", le recouvrement de ces espèces diminue quand le recouvrement du Thurifère augmente, donc quand le pourcentage de carbone organique augmente. Cependant, la zone de très faible recouvrement ne suit pas ce schéma général, car les prélèvements ont été réalisés dans la partie haute de la thuriféraire, à la limite de la xérophytaie, là où les arbres sont certes peu nombreux, mais en revanche peu dégradés. Les fortes valeurs de carbone organique observées correspondraient, dans le cas des prélèvements sous la couronne, à un houppier bien préservé, descendant jusqu'au sol protégeant ainsi les horizons superficiels de l'érosion,

et dans le cas des prélèvements hors couvert, à la présence d'une strate chaméphytique très développée.

2.2.2.4. Le stock carboné

Les différences de stock carboné entre les deux catégories de profils sont relativement importantes (Tableau 17): les secteurs sous couvert possèdent un stock carboné 2,3 fois plus élevé que les secteurs hors couvert, représentant une différence de 29 t/ha.

	Surface (ha)	Carbone organique Sous couvert (t/ha)	Carbone organique Hors couvert (t/ha)	Carbone organique Total (t/ha)
Recouvrement par le Thurifère: 10%	819	62 (3,9)	27 (0,7)	31 (0,7)
Recouvrement par le Thurifère: 23%	1088	42 (2,3)	16 (0,5)	22 (0,6)
Recouvrement par le Thurifère: 29%	260	50 (3,4)	27 (0,7)	34 (1,1)
Recouvrement par le Thurifère: 76%	17	89 (6,1)	34 (0,8)	76 (4,7)
Thuriféraie totale		51 (3,0)	22 (0,6)	27 (0,8)

() écart type

Tableau 17: Stock carboné souterrain de la Thuriféraie

En l'absence de xérophytes et de plantes herbacées sous la couronne des arbres, cet enrichissement en carbone organique des niveaux superficiels (surtout sensible dans les 15 premiers centimètres), peut être principalement attribué à la présence du Thurifère.

De ces résultats, il ressort donc que la Thuriféraie de la vallée de l'Azzaden, avec une surface de 2184 ha, fixe au total environ 59 000 tonnes de carbone organique souterrain, soit une moyenne de 27 T/ha. Si l'on rapproche ces résultats de ceux obtenus par Dobremez (1979) sur les sols Himalayens dans une formation forestière du Subalpin supérieur sec (environ 70 t/ha), il apparaît que le stock carboné de cette Thuriféraie est faible. Les résultats obtenus par McDaniel & Graham (1992) sur des formations arborée semi-arides (Pins-Genévriers) du nord-ouest des États-Unis, selon lesquels hors couvert le stock carboné varie de 62 à 168 t/ha, alors que sous le couvert des arbres il varie de 591 à 594 t/ha, vont dans le même sens.

Le stock carboné de ce milieu apparaît donc faible comparé à des milieu écologiquement ou structurellement similaires, ce que confirment les travaux de Zinke *et al.* (1984) qui synthétisent les données obtenues pour les différents écosystèmes terrestres par divers auteurs, et avancent pour les écosystèmes méditerranéens arborés, arbustifs, ou de savane, un stock carboné moyen de 75 t/ha. Selon ces auteurs, le stock carboné que nous avons obtenu

pour la vallée de l'Azzaden situerait cet écosystème méditerranéen d'altitude au même niveau que les "déserts arbustifs".

2.2.3. Conclusion

La comparaison des densités apparentes du sol et de la terre fine entre les différents profils révèle une augmentation de la densité apparente selon un gradient vertical (de la surface vers les horizons profonds) en liaison avec une baisse du pourcentage de terre fine, et horizontal (des secteurs sous couvert vers les secteurs hors couvert). Cette différence entre profils sous couvert et hors couvert résulte principalement de l'absence d'horizon humifère dans ces derniers, suite au décapage des horizons de surface dans les zones non protégées par la couronne des arbres. Les conséquences de cette érosion du manteau humifère sont tout d'abord sensibles au niveau du pH. En effet, bien que le substrat soit acide, le pH mesuré sous le houppier des Thurifères est toujours supérieur à 7, même en profondeur. L'arbre génère donc sous son couvert un microédaphisme particulièrement visible lors de l'étude du carbone organique.

Sous couvert, nous avons enregistré des pourcentages de carbone dans les horizons superficiels, quatre à sept fois plus élevés que dans les profils réalisés entre les arbres. En outre, la diminution des taux de carbone organique avec la profondeur est très marquée (passage de 4 à 0,2%), traduisant un état "d'équilibre" ou biostasie, que l'on ne retrouve pas dans les profils hors couvert, pour lesquels on observe une répartition homogène du carbone organique sur tout le profil. Cet isohumisme que certains auteurs attribuent au brassage des niveaux superficiels (Baudière & Serve, 1971; Fromard, 1978; Gauquelin & Baudière, 1981; Gauquelin, 1988) révèle une instabilité (rhexistasie) qui s'explique aux hautes altitudes par l'intensité des phénomènes périglaciaires (gélifluxion et cryoturbation), et aux altitudes plus basses par l'érosion éolienne, le ruissellement et le piétinement des troupeaux, phénomènes favorisés par la diminution de la couverture végétale.

Mais ces processus érosifs semblent également responsables d'une certaine redistribution du carbone organique entre les secteurs hors et sous couvert. En effet, dans ces deux types de profils, les taux de carbone organique augmentent avec le recouvrement des Thurifères, ce qui impliquerait pour les espaces inter-canopées un apport actuel en provenance des horizons superficiels des zones sous couvert, ou encore un apport ancien par des arbres aujourd'hui disparus. Pour les zones sous canopée, cette augmentation semble être le fait d'arbres plus

gros dans les secteurs à forte densité de couvert, induisant de ce fait une chute de litière plus abondante, à laquelle s'ajoute également une diminution de l'érosion en liaison avec l'augmentation du recouvrement des arbres.

Convertis en stock carboné, ces résultats permettent d'évaluer à 27 t/ha la quantité moyenne de carbone organique stockée dans la partie souterraine de cet écosystème, valeur que l'on peut considérer comme faible en comparaison des 70 à 75 t/ha obtenues par d'autres auteurs dans des écosystèmes pré-steppiques.

Ces valeurs apparaissent d'autant plus faibles, que la phytomasse du peuplement estimée dans le chapitre précédent, ainsi que le pourcentage de carbone organique, sont relativement élevés, et que les prélèvements au cylindre induisent une estimation par excès. Deux hypothèses peuvent être avancées pour expliquer ce déficit. La première est que le recouvrement moyen de la Thuriféraie est faible (moins de 20%) induisant une faible représentativité des zones sous couvert riches en matières organiques, et la seconde, conséquence de la précédente, est l'importance de l'érosion et du ruissellement, agents principaux d'altération des horizons superficiels les plus humifères. Avec seulement 40 cm de profondeur moyenne, ces sols squelettiques semblent donc inaptes à stocker la totalité du carbone organique issu du fonctionnement de cet écosystème. Comme nous l'avons évoqué dans le chapitre " Les caractéristiques dendrométriques et le sex-ratio de la population ", cette perte de carbone dans le sol entraîne de graves problèmes de régénération du peuplement (Alifriqui, 1993), dont les potentialités de fixation du carbone atmosphérique se trouvent réduites, et les risques d'érosion des versants accrus par l'ouverture du milieu. Les thuriférais du Maroc se trouvent donc dans un cycle de dégradation qui s'auto-alimente puisque l'érosion empêche les germinations et que la faible régénération ôte tout espoir de voir se densifier le peuplement permettant d'atténuer les processus érosifs.

Les résultats, qu'ils soient exprimés en pourcentage de carbone organique dans le sol, ou encore en stock carboné (exprimé en t/ha), convergent donc tous vers la même constatation: le Genévrier thurifère par sa production de litière (11 t/ha/an, d'après Gauquelin *et al.*, 1992 et 1998) est le moteur essentiel du transfert au sol du carbone organique et la protection qu'offre sa couronne constitue l'un des derniers remparts contre la steppisation de ces sols de haute montagne. Le manteau humifère qui se développe sous le couvert de l'arbre revêt une importance écologique considérable: d'une part il constitue avec les xérophytes, l'un dernier

refuge des rares germinations encore observables dans le milieu (Gauquelin, 1988), d'autre part, il a une action stabilisatrice sur la structure du sol et augmente la capacité de stockage de l'eau utilisable par les plantes (Mustin, 1987), phénomène essentiel dans une région où le régime pluviométrique est irrégulier.

Fixateur du carbone atmosphérique, il est donc aussi le principal agent responsable de l'immobilisation du carbone organique dans le sol, ce qui lui confère une place privilégiée dans le cycle du carbone de ces écosystèmes méditerranéens d'altitude.

RÉSUMÉ

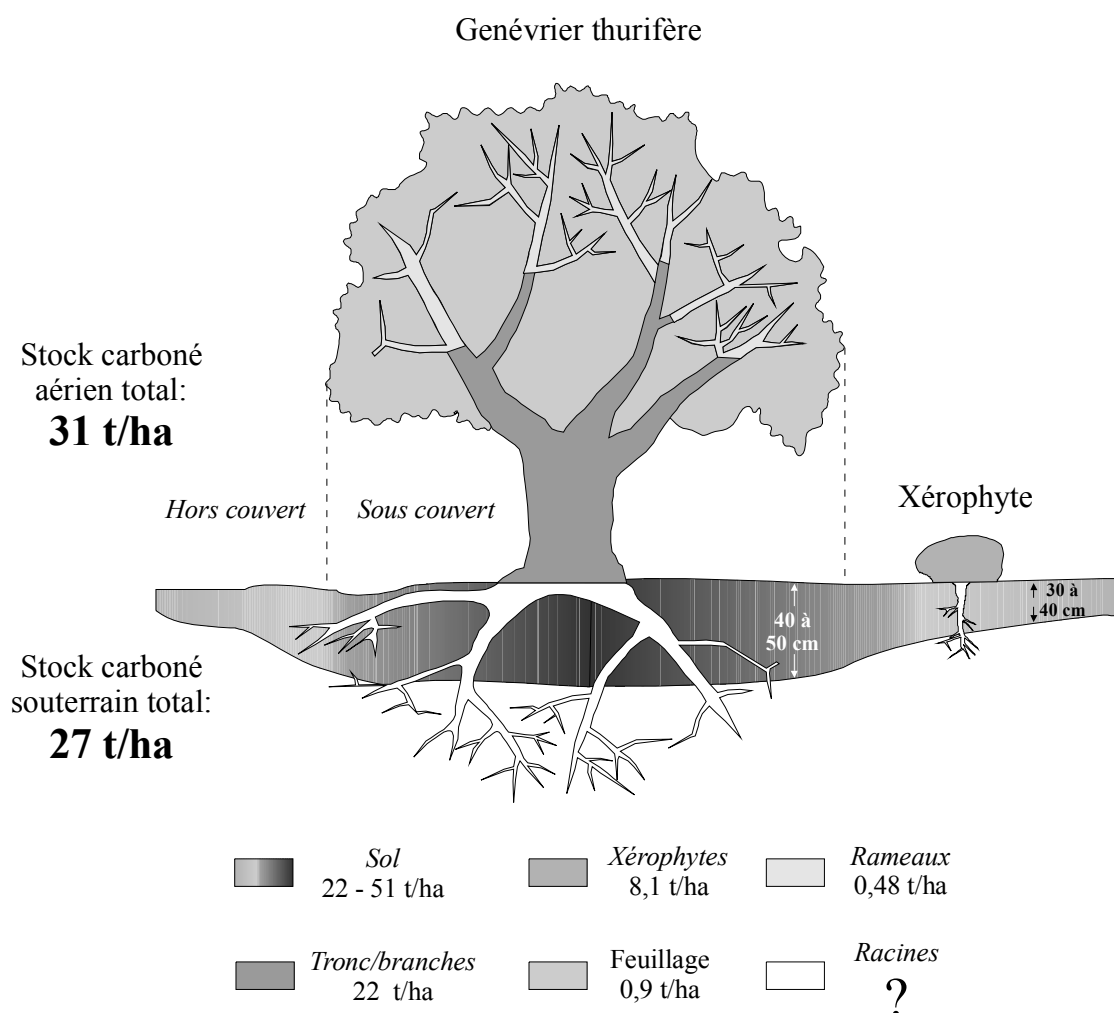
Le Stock Carboné Souterrain

- ✓ Substrat: principalement des schistes
- ✓ Profondeur moyenne du sol: 40 cm
- ✓ Densité apparente du sol:
 - ① Hors couvert: environ 1370 g/l
 - ① Sous couvert: environ 1140 g/l
- ✓ Pourcentage de terre fine:
 - ① Hors couvert: 47 ± 20 %
 - ① Sous couvert: 51 ± 17 %
- ✓ Pourcentage de carbone organique:
 - ① Hors couvert: Répartition homogène dans le profil (isohumisme)
 - ① Sous couvert: Diminution en fonction de la profondeur (biostasie)
- ✓ Stock carboné:
 - ① Hors couvert: 22 t/ha
 - ① Sous couvert: 51 t/ha
 - ① Moyenne: 27 t/ha

2.3. Synthèse des résultats de stock carboné aérien et souterrain

La contribution des différents compartiments du Genévrier thurifère dans les potentialités de stockage du carbone de ce taxon met en évidence le rôle majeur du (ou des) tronc(s), et des branches (Figure 37). En effet, ce compartiment représente près de 94 % du stock carboné total de la partie épigée de l'arbre.

Représentant un réservoir de carbone près de dix fois plus important que le feuillage du Thurifère, les xérophytes sont également un acteur essentiel du stockage du carbone dans ces écosystèmes.



Valeurs moyennes de stock carboné aérien et souterrain
de la Thuriféraie de la vallée de l'Azzaden

Figure 37

La somme de ces différentes composantes permet d'estimer le stock carboné aérien total à environ 31 t/ha. Le stock carboné souterrain moyen, qui en l'absence de mesures effectuées sur l'appareil racinaire, correspond en fait au stock carboné moyen du sol, est estimé à environ 27 t/ha, les valeurs oscillant entre 22 t/ha hors du couvert des arbres et 51 t/ha sous canopée.

La rapport "stock carboné aérien / stock carboné souterrain" est donc voisin de l'unité. Or, si l'on fait la synthèse des travaux de Zinke *et al.* (1984) et Olson *et al.* (1983) sur les grands écosystèmes terrestres, on s'aperçoit que ce rapport est généralement en faveur du stock carboné souterrain. Cette répartition homogène du carbone entre la partie épigée et hypogée de l'écosystème traduit donc un déficit du stock carboné souterrain, qui vient confirmer nos observations précédentes issues de la comparaison de nos résultats avec ceux d'écosystèmes semi-arides ou de haute montagne (Dobremez, 1979; Zinke *et al.*, 1984; McDaniel & Graham, 1992). Deux facteurs essentiels peuvent expliquer la nature de ce déficit en carbone au niveau du sol: le premier est le faible pourcentage de recouvrement des genévriers thurifères, sous la couronne desquels peut se développer un horizon humifère riche en matière organique; le second tient à la profondeur du sol qui dépasse rarement 40 cm, suite au décapage des niveaux superficiels dont la teneur en carbone organique est la plus forte (Gauquelin *et al.*, 1998b). Les phénomènes érosifs, apparaissent donc comme une composante déterminante du cycle du carbone dans ces milieux altimontains, et doivent être précisément quantifiés si l'on souhaite estimer les pertes en carbone organique, et tenter de modéliser l'évolution à court et moyen terme du stock carboné total. L'étude d'une parcelle mise en défens à l'Azzaden depuis 1989 (Ouhammou, 1992; Ouhammou *et al.*, 1996) pourrait permettre, par comparaison avec nos données, de mettre en évidence la part de l'action anthropique dans la dynamique érosive du milieu.

Pour la première fois, des données extrêmement précises sont fournies pour ce type d'écosystème. Mais au-delà de l'intérêt local d'une étude sur le stockage du carbone dans un écosystème de haute montagne méditerranéenne, ce travail apporte des résultats nouveaux susceptibles de compléter les bases de données internationales sur les stocks de carbone des différents écosystèmes terrestres, tant il est vrai que les données utilisées dans les études globales sont imprécises et fragmentaires. A titre d'exemple, les travaux de Zinke *et al.* (1984) sur le carbone du sol à l'échelle mondiale ne mentionnent pas d'écosystème de type méditerranéen en Afrique, et les seules données de stock carboné disponibles pour tout le Maroc concernent la région de Fès et de Ouezzane, dans le nord du Maroc, où l'on trouve des

forêts de chêne liège et de thuya. On peut également s'interroger sur la validité des valeurs de stock carboné présentées par incrément de 1° de latitude, quand on sait qu'au Maroc, à la même latitude on trouve aussi bien des déserts de sable que des formations steppiques ou des forêts denses de chêne vert, et que la valeur moyenne de stock carboné du sol annoncée par ces auteurs pour la latitude de notre site d'étude est de 100 t/ha (notre estimation est de 27 t/ha pour la Thuriféraie).

Une meilleure connaissance des capacités de stockage du carbone de ces écosystèmes marginaux est donc nécessaire à l'amélioration des modèles pour l'estimation des stocks de carbone actuels. De même, ces données sont indispensables si l'on souhaite reconstituer les variations du réservoir continental de carbone depuis la dernière glaciation, notamment par l'étude de données polliniques (Van Campo *et al.*, 1994).

4^{EME} PARTIE: SYNTHESE CARTOGRAPHIQUE ET APPROCHE DIACHRONIQUE DE L'EVOLUTION DE LA THURIFERAIE ENTRE 1965 ET 1989

- Évolution entre l'année 1965 et l'année 1989 -

Dans les milieux où la pression démographique est forte, on peut s'attendre à des perturbations importantes dans la végétation, perceptibles sur des échelles de temps même réduites.

A travers une approche diachronique de la couverture arborée de cette vallée, nous avons tenté de quantifier, en terme de phytomasse, de minéralomasse et de stock carboné, l'impact des activités humaines sur l'écosystème Thuriféraie sur une période de 24 ans. Ce travail est basé sur la comparaison d'une mission aérienne de 1965, et d'une scène SPOT de 1989 (aucune mission aérienne postérieure à 1965 n'ayant été réalisée). En raison de la difficulté et du biais résultants de la comparaison de deux images issues de méthodes d'acquisition très différentes, les résultats présentés ici doivent être pris avec prudence. Pour cette étude, nous avons utilisé plusieurs types de supports:

- La scène SPOT du 06/05/1989, n° 31287
- La mission aérienne de 1965 n° 169
- Les cartes topographiques au 1/50 000 du "Jbel Toubkal" (feuille NH-29-XXIII-Ia, 1968) et "d'Amezmiz" (feuille NH-29-XXII-2b, 1974)
- La carte de la végétation de la partie occidentale du Haut Atlas marocain (Ouhmidou, 1993 et Ouhmidou *et al.*, 1994), la carte de la végétation du bassin versant de l'Oued Rheghaya (Haloui, 1986) et la carte de la végétation de l'Azzaden (Donadieu *et al.*, 1976 et Hammoudi, 1977)
- Les données de terrain

1. DEMARCHE METHODOLOGIQUE

1.1. Géoréférencement

La scène SPOT ainsi que la photographie aérienne sont basées sur deux supports distincts, et présentent donc des "déformations" différentes liées à l'acquisition des données. Afin de

pouvoir comparer ces deux documents entre eux et de réaliser ultérieurement une correction des surfaces par la pente, nous avons au préalable géoréférencé ces deux cartes, en calculant les coordonnées géographiques de 10 points (homologues sur les deux documents) répartis uniformément sur la zone étudiée.

1.2. Traitement de la photographie aérienne de 1965

La photographie aérienne sur laquelle nous avons travaillé est issue d'une mission de 1965 (n° 169), en noir et blanc, et couvre la totalité de la zone d'étude avec une échelle au 1/51 163.

Dans un premier temps, cette photo a été scannée à 200 dpi (résolution autorisant un grossissement permettant de discerner tous des détails nécessaires). Cette opération nous a donc conduit à calculer l'échelle d'affichage de cette image, et par conséquent la surface couverte au sol par un pixel.

1.2.1. Calcul de l'échelle

Avec une résolution de 200 dpi (soit 200 pixels par pouce, 1 pouce mesurant 2,54 cm), la taille du pixel est de : $2,54/200 = 0,0127$ cm.

Sachant que l'échelle de la photo aérienne est de 1/51 163, la distance couverte au sol par un pixel est alors de $0,0127 \times 51163$ cm = 650 cm.

Au sol, le pixel représente donc un carré de 6,5 de côté, soit une surface de 42,25 m².

1.2.2. Élaboration de la carte de recouvrement du Thurifère (année 1965)

La première étape consiste à délimiter le contour de la thuriféraie afin de supprimer de l'image tous les pixels inutiles. Ce travail repose essentiellement sur une détermination visuelle, la forme des houppiers des Thurifères ainsi que leur densité permettant une identification aisée. Le choix des limites du peuplement a également été guidé par la connaissance de l'écologie de l'espèce.

Notre but étant d'obtenir une carte composée de quatre couleurs exprimant quatre intensités de recouvrement du Genévrier thurifère, il était nécessaire de réduire la quantité d'information contenue dans cette photo. En effet, le succès de cette approche repose sur le principe que les couverts sont correctement représentés par la valeur de gris des pixels de l'image (Marceau & Gratron, 1993). Il est donc nécessaire que la taille du pixel soit supérieure à la taille du

houppier d'un individu, afin que la valeur de gris des pixels corresponde à l'intégration des valeurs de radiance de plusieurs houppiers et de plages de sol nu.

Ainsi, sur la zone précédemment définie, nous avons tout d'abord appliqué un lissage par filtre majoritaire, avant de réduire le nombre de niveaux de gris de l'image à 4. Les ombres étant codées par des pixels foncés, les secteurs cartographiés comme étant très denses ont donc fait l'objet de corrections.

1.3. Traitement de la scène SPOT de 1989

Rappelons quelques données de base communément utilisées depuis 1984. L'image SPOT est composée de 3 canaux (XS1: 0,5-0,59 μm , XS2: 0,61-0,68 μm , XS3: 0,79-0,89 μm), qui correspondent aux longueurs d'ondes utilisées lors de l'acquisition de l'image (Canal Vert, Canal Rouge et Canal Proche Infrarouge), chacun des ces canaux étant codé en 256 couleurs.

La taille du pixel au sol est d'environ 20 m x 20 m.

Le logiciel de traitement d'image que nous avons utilisé est *Idrisi* pour *Windows*.

Chaque bande spectrale apportant son lot d'informations radiométriques, la combinaison des données spectrales de chaque pixel permet d'établir des liens plus fiables entre l'ensemble des informations physiques et les classes d'objets prédéfinis.

1.3.1. Les différentes images obtenues à partir de la scène SPOT

1.3.1.1. L'indice de végétation normalisé

L'indice de végétation normalisé (NDVI) est théoriquement corrélé à la densité de la végétation verte répartie à la surface de la terre. Par commodité et aussi parce qu'il est le plus commun, cet indice nous a semblé pouvoir être utilisé dans ce test préliminaire d'analyse spatiale. C'est donc sur cet indice que nous nous sommes préférentiellement appuyé, utilisant les autres résultats issus du traitement des données spatiales comme un apport supplémentaire, notamment dans les parties de la scène dont l'analyse s'est révélée particulièrement délicate. Les différentes valeurs du NDVI sont obtenues pour chaque pixel à partir de la formule suivante:

$$NDVI = \frac{XS_3 - XS_2}{XS_3 + XS_2}$$

XS_3 : Proche Infrarouge

XS_2 : Rouge

Sur la représentation couleur (Figure 38), la végétation verte a été conventionnellement représentée en vert, et le sol nu en brun.

1.3.1.2. Les images linéarisées (seuillage)

A partir des trois canaux de la scène SPOT initiale (vert, rouge et PIR), on extrait 3 images. Pour chacune d'elles, on procède à une linéarisation manuelle (ou seuillage) afin d'éliminer le "bruit" pouvant masquer des informations. Cette étape consiste donc à définir les seuils au delà ou en deçà desquels la réponse spectrale des pixels n'apporte pas d'information supplémentaire. La bande spectrale ainsi réduite est ré-échantillonnée (les informations sont étalées sur les 256 niveaux).

1.3.1.3. La composition colorée

La composition colorée est obtenue par synthèse chromatique des trois images précédentes en une image à trois couches (Bleu, Vert, Rouge). Sur ce type de document (cf. Figure 38), la végétation apparaît en rouge, et le sol nu en vert ou bleu. Les couleurs brunes correspondent à des stades intermédiaires. Compte tenu du relief très accidenté de la vallée de l'Azzaden et donc des ombres couvrant certains versants, les diverses classifications supervisées que nous avons tentées n'ont pas été satisfaisantes. En revanche, cette composition colorée, comme on pouvait s'y attendre, constitue une étape supplémentaire par rapport à celle du NDVI, dans la discrimination des formations végétales qui nous intéressent.

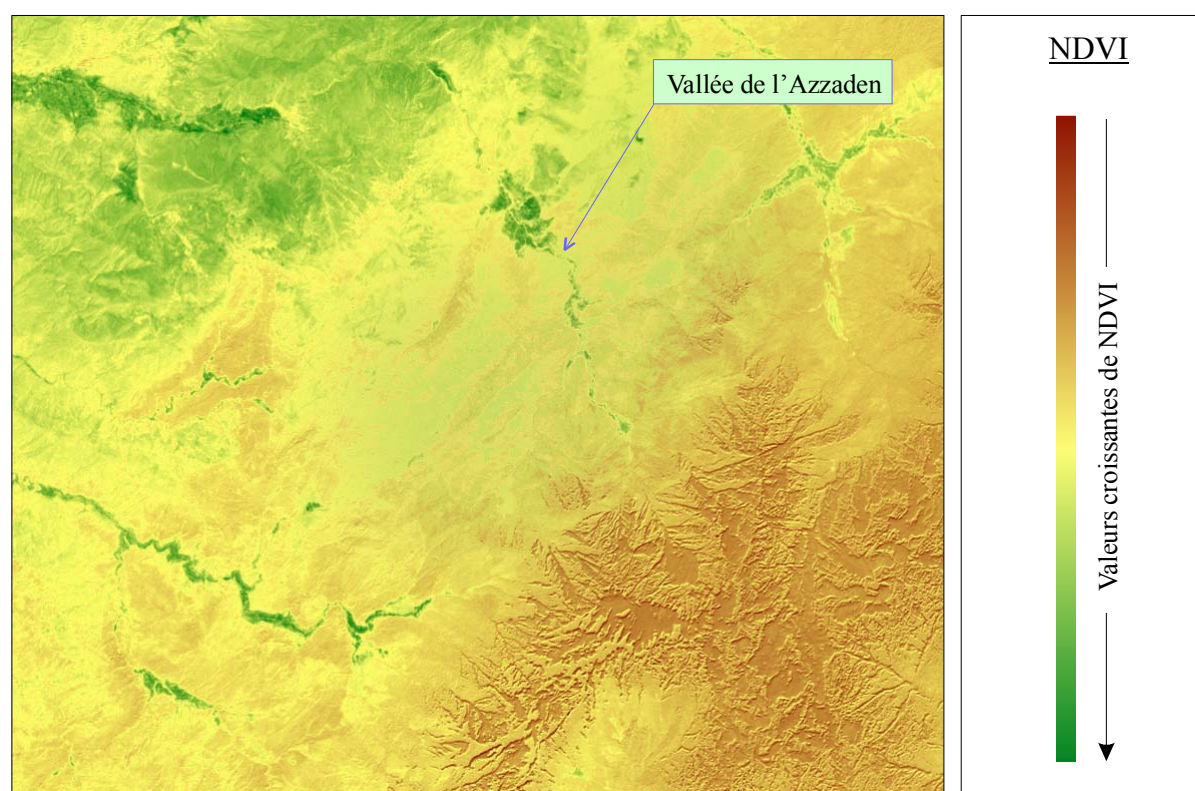
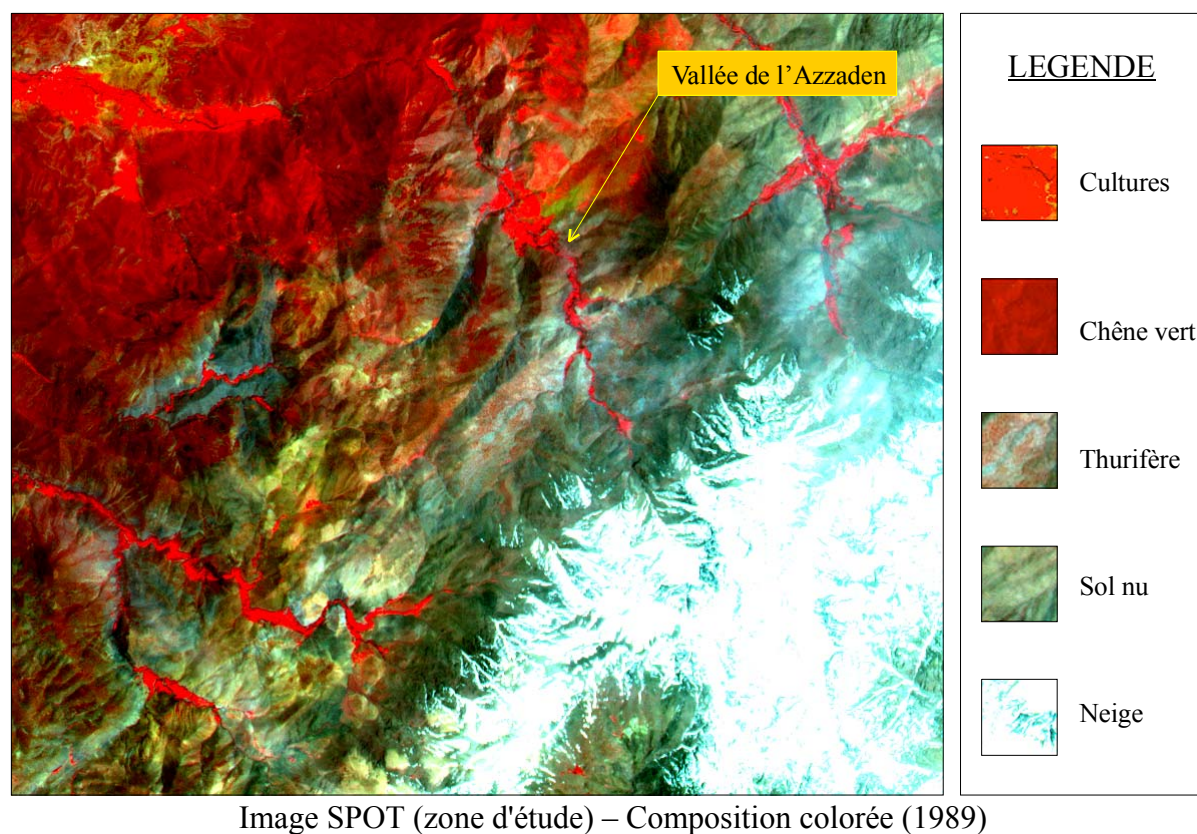


Figure 38

1.3.2. Élaboration de la carte de recouvrement du Thurifère (année 1989)

Avant de passer au traitement cartographique des images obtenues précédemment, nous avons procédé à la suppression de tous les pixels situés en dehors des limites strictes de la Thuriféraie de la cette vallée. Ce travail a été grandement facilité par la connaissance du terrain, par les cartes de végétation établies précédemment (Ouhmidou, 1993; Haloui, 1986), ainsi que par le caractère monospécifique de la strate arborée du peuplement étudié.

Quatre grands ensembles ont ainsi été supprimés sur les images à traiter:

les zones de culture localisées en fond de vallée (en rouge vif sur la composition colorée et en vert sombre sur l'image NDVI couleur)

Les formations à chêne vert (en rouge sombre sur la composition colorée et en vert pâle à vert foncé sur l'image NDVI couleur)

Les zones de sol nu et les parties enneigées (en jaune, vert, bleu et blanc sur la composition colorée et en brun foncé sur l'image NDVI couleur)

Les zones situées à faible altitude (< 1800 m) dans lesquelles on ne rencontre pas de Genévrier thurifère.

Notre traitement cartographique a eu pour supports l'image NDVI d'une part et une classification supervisée d'autre part. A partir des différents pourcentages de recouvrement calculés d'après les mesures de terrain, nous avons pu, après repérage de ces secteurs sur l'image, attribuer aux quatre classes de densité de couvert précédemment définies (cf. p. 39), quatre "classes radiométriques". L'image en 256 niveaux a ainsi été convertie en une image à 4 couleurs, correspondant, dans leur grandes lignes, aux quatre classes de recouvrement du Thurifère. L'étape finale a consisté à valider cette cartographie en fonction de nos connaissances du terrain.

1.4. Correction géométrique

Afin que les deux cartes obtenues puissent être comparées directement et que les surfaces puissent être corrigées par la pente, nous avons appliqué à ces deux documents une correction géométrique, en utilisant comme système de référence le fond topographique obtenu après numérisation des deux cartes topographiques de la vallée au 1/50 000^{ème}. Ce travail a été

réalisé à l'aide du logiciel *Ilwis*. Les cartes étant géoréférencées dans le même système de coordonnées que la carte topographique, nous pouvons maintenant envisager une correction des surfaces par la pente.

1.5. Correction des surfaces par la pente

Les cartes réalisées à partir de l'image satellitale et de la photographie aérienne correspondent à la projection sur un plan de surfaces plus ou moins inclinées. Les calculs de superficies sont donc d'autant plus sous estimés que la pente est forte. Or, la topographie de cette vallée de haute montagne est caractérisée par des pentes abruptes, dont il faut tenir compte si l'on souhaite obtenir des résultats précis. En effet, avec une pente moyenne de 30°, la sous estimation des surfaces est d'environ 15%. En l'absence de correction, cela représenterait pour la Thuriféraie, un biais de plus de 300 ha.

1.5.1. Élaboration de la carte des pentes

La carte des pentes a été réalisée en appliquant sur la carte topographique une grille dont la maille triangulaire isocèle est d'une hauteur de 2 mm. Pour chaque maille, nous avons déterminé la classe de pente correspondante (nombre de courbes de niveau par maille) en se basant sur une échelle de référence préalablement déterminée (cf. Figure 39).

Sur une carte au 1/50 000^{ème} et avec une équidistance des courbes de niveau de 25m, chaque courbe de niveau supplémentaire dans une maille triangulaire de 2 mm de haut correspond à un incrément de pente de 25% (soit approximativement 15° pour la première classe, puis 10° pour les classes de pentes suivantes).

La maille triangulaire est préférable à la maille carrée car dans cette dernière, les courbes de niveaux peuvent être, soit perpendiculaires à la base du carré, soit perpendiculaires à la diagonale, induisant de ce fait un biais dans l'estimation de la pente.

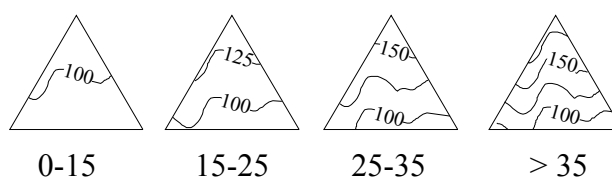


Figure 39: Classes de pente en degrés

Cette carte étant destinée à être superposée aux cartes de densité, les contours ont ensuite été lissés pour plus de lisibilité.

1.5.2. Correction des surfaces

La correction des surfaces par la pente consiste dans un premier temps à superposer la carte des pentes à celle du recouvrement. Ensuite, pour chaque classe de recouvrement par le Thurifère, on calcule la surface de chacune des quatre classes de pente (soit au total 16 combinaisons possibles). Ces surfaces sont enfin corrigées en fonction de la pente à laquelle elles se réfèrent par la formule:

$$S = s / \cos \alpha$$

où: S = Surface corrigée; s : surface avant correction; α = centre de la classe de pente en degré
Toutes les superficies présentées dans cette étude correspondent donc à des surfaces corrigées par la pente et non à leur projection sur un plan.

1.5.3. Synthèse topographique

La carte des pentes de la Thuriféraie nous permet de connaître la proportion relative de chacune des classes de pente, ainsi que la pente moyenne du peuplement.

Ainsi, il apparaît que seule la classe de pente 0 – 15° est vraiment minoritaire (5%), la classe de pente 15 – 25° étant la mieux représentée (41%). On peut également noter que les fortes pentes sont très fréquentes, 26 et 29% de la surface totale de la Thuriféraie étant localisée respectivement sur des pentes de 25 – 35° et 35 – 45°.

Cette formation à genévriers thurifères se développe donc sur des pentes abruptes, la pente moyenne de la Thuriféraie étant estimée à 28°.

2. ANALYSE DIACHRONIQUE DU PEUPLEMENT: PERIODE 1965 - 1989

Les résultats de biomasse, minéralomasse et stock carboné que nous avons obtenu sont tous liés à l'importance du recouvrement arboré. Pour cette raison, il nous a été possible, en comparant les surfaces relatives des différentes zones de densité de couvert entre l'année 1965 et l'année 1989, d'étudier et d'estimer les variations de ces différents paramètres.

N'ayant pas à notre disposition une vérité terrain des recouvrements estimés sur la photographie aérienne de 1965, les bases de cette analyse diachronique reposent sur donc sur l'hypothèse préalable selon laquelle, les pourcentages de recouvrement respectifs des quatre zones de densité de couvert sont les même entre les deux dates.

Ces deux cartes étant basées sur des documents très différents, tant au niveau de la méthode d'acquisition que de la nature des informations qu'ils contiennent, on ne peut envisager une comparaison au pixel près. En effet, d'une part la correction géométrique laisse subsister certaines déformations, et d'autre part le traitement numérique appliqué aux deux images est différent. Nous nous intéresserons donc aux quatre grandes unités cartographiques prises dans leur ensemble, ainsi qu'à l'évolution du couvert dans certains secteurs particulièrement bien identifiés.

La comparaison de la superficie totale de la Thuriféraie entre 1965 et 1989 met en évidence une régression importante du peuplement (Tableau 18): la surface de la Thuriféraie en 1965 est estimée à 2622 ha, ce qui rejoint les travaux de Hammoudi (1977) et Donadieu *et al.* (1976) qui estimaient la superficie de ce peuplement à 2680 ha. Comparée à la surface de 1989 (2184 ha), on peut donc noter, sur les 24 dernières années, une réduction de 438 ha (soit plus de 17 ha par an), représentant une déforestation annuelle de 0,7%, valeur très proche de celle avancée par Barbero *et al.* (1990a & 1990b) du déboisement annuel à l'échelle nationale (0,6%).

	1989	1965	Différence	Différence moyenne (t/ha/an)
Superficies (ha)				
Recouvrement par le Thurifère: 10%	819	1109	-290	
Recouvrement par le Thurifère: 23%	1088	1223	-135	
Recouvrement par le Thurifère: 29%	260	254	6	
Recouvrement par le Thurifère: 76%	17	36	-19	

Thuriféraie totale	2184	2622	-438	
Biomasse (t)				
Biomasse du Thurifère	106110	125210	-19100	-0,36
Biomasse des Xérophytes	39730	49786	-10056	-0,19
Biomasse Totale	145841	174997	-29156	-0,55
Minéralomasse (t)				
Ca total	2279	2715	-436	$-8,6 \times 10^{-3}$
K total	139	169	-30	$-5,7 \times 10^{-4}$
Mg total	482	585	-103	$-1,9 \times 10^{-3}$
N total	564	694	-130	$-2,5 \times 10^{-3}$
Éléments minéraux totaux	3464	4163	-702	$-1,3 \times 10^{-2}$
Stock carboné (t)				
Carbone épigé	68480	82081	-13601	-0,25
Carbone du sol	-	-	-2190	$-4,1 \times 10^{-2}$

Tableau 18: Comparaison des cartes de 1965 et 1989

La zone dont le recul est le plus marqué est celle de forte densité de recouvrement par le Genévrier thurifère, pour laquelle on enregistre une diminution de la superficie de plus de 50%. La comparaison des cartes (Figure 40 p. 152 et Figure 41 p. 153) révèle que cette régression concerne principalement le secteur nord de la vallée, probablement en liaison avec la proximité de plusieurs villages (Taddert, Tahaliouine, Agouinane et Aït Aïssa).

Pour les deux zones les plus clairsemées, les pertes sont plus faibles en pourcentage, mais concerne des superficies beaucoup plus importantes: ainsi, la zone de plus faible densité accuse un recul de près de 300 ha, soit environ 25% de la surface initiale. Le secteur qui semble le plus touché par cette déforestation correspond au quart sud-est de la vallée. Il est intéressant de noter que cette partie de la vallée est très fréquentée par les troupeaux, comme en témoigne la présence de bergeries ("Azib"). La carte des parcours de la vallée dressée par Donadieu *et al.* (1976), révèle en effet que ce secteur correspond en fait à une zone de chevauchement entre les parcours d'été et les parcours d'hiver de Tizi Oussems, la partie haute faisant fréquemment l'objet d'incursion de troupeaux appartenants à la vallée voisine

(Hammoudi, 1977). Donadieu *et al.* (1976) notent que les parcours inférieurs à 2400 m sont utilisés toute l'année, sauf interruptions de courte durées par les chutes de neige. Les arbres y sont donc exploités non seulement pour le fourrage qu'ils fournissent au troupeau, mais aussi par le berger qui utilise le bois pour se chauffer. En outre, les murs des "azib" sont systématiquement couronnés de nombreuses branches entrelacées de genévriers thurifères, pour protéger le troupeau des chien errants, ce qui accentue la dégradation au voisinage des bergeries.

On assiste donc progressivement à une érosion des densités de couvert, par passage d'une classe de densité à la classe inférieure, aboutissant dans les secteurs les plus clairsemés à l'élimination totale de la couverture arborée.

Les pertes en biomasse que représente cette déforestation (Tableau 18) sont estimées à environ 19 000 tonnes pour le Genévrier thurifère, soit 360 kg/ha/an. Si l'on y ajoute les xérophytes, cette perte annuelle s'élève à environ 550 kg/ha/an. Nous étudierons plus loin l'importance de cette perte en fonction de la productivité du peuplement et du prélèvement de bois de feu par la population (cf. 5^{ème} partie, chapitre 3: "Les besoins en bois et les ressources disponibles: bilan", page 163).

Dans cette analyse, nous avons considéré que l'élimination complète du Thurifère s'accompagnait d'une élimination complète des xérophytes. Or, il est probable que dans ces secteurs les plus dégradés, subsiste une strate chaméphytique réduite. Cependant, la comparaison des cartes n'ayant pu être réalisée qu'après la phase de terrain, ces secteurs déboisés ont été localisés trop tardivement pour nous permettre d'y étudier l'importance de la végétation xérophytique. Le biais qui en résulte peut toutefois être considéré comme faible, l'élimination de la strate arborée précédant souvent de peu celle des petits ligneux.

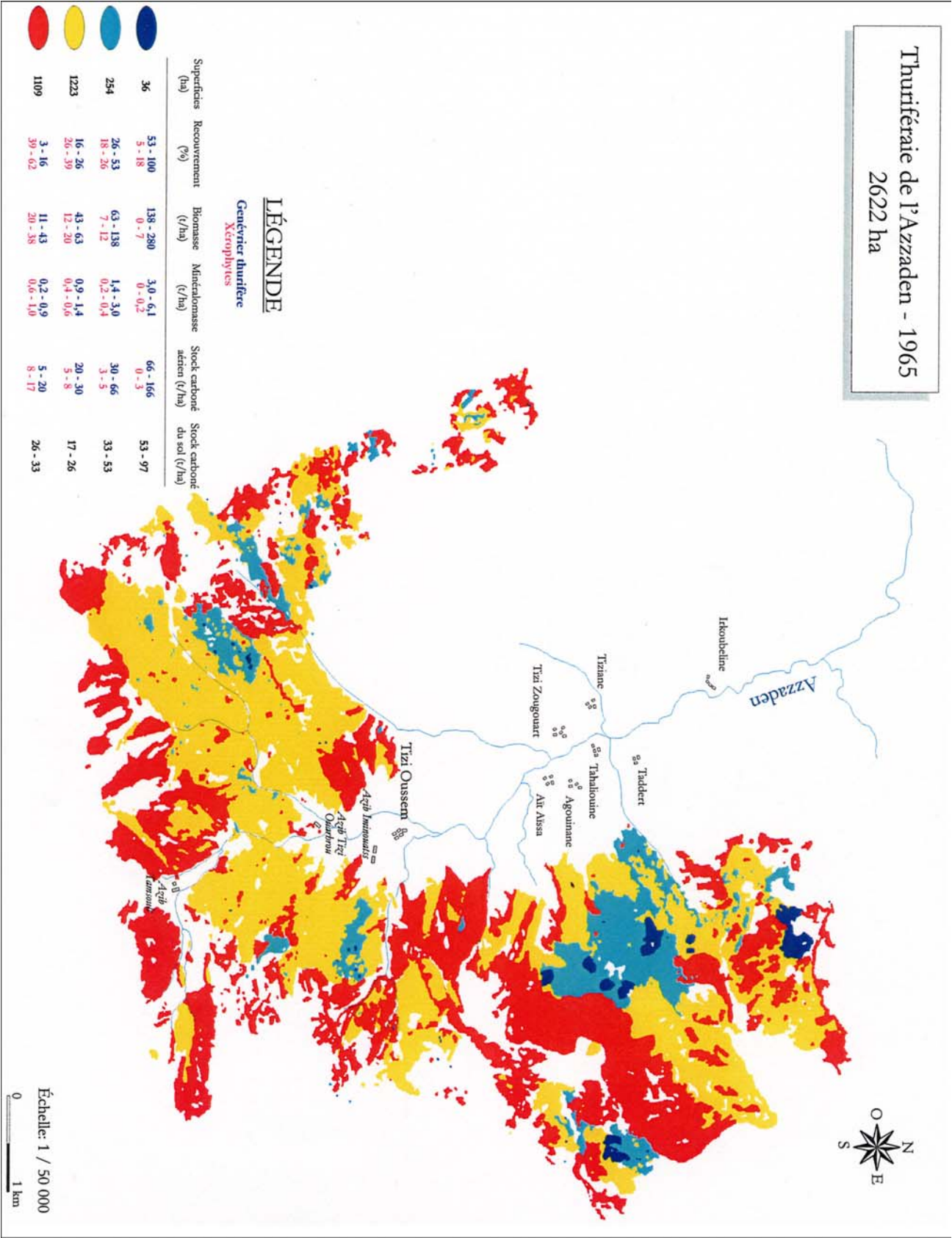


Figure 40

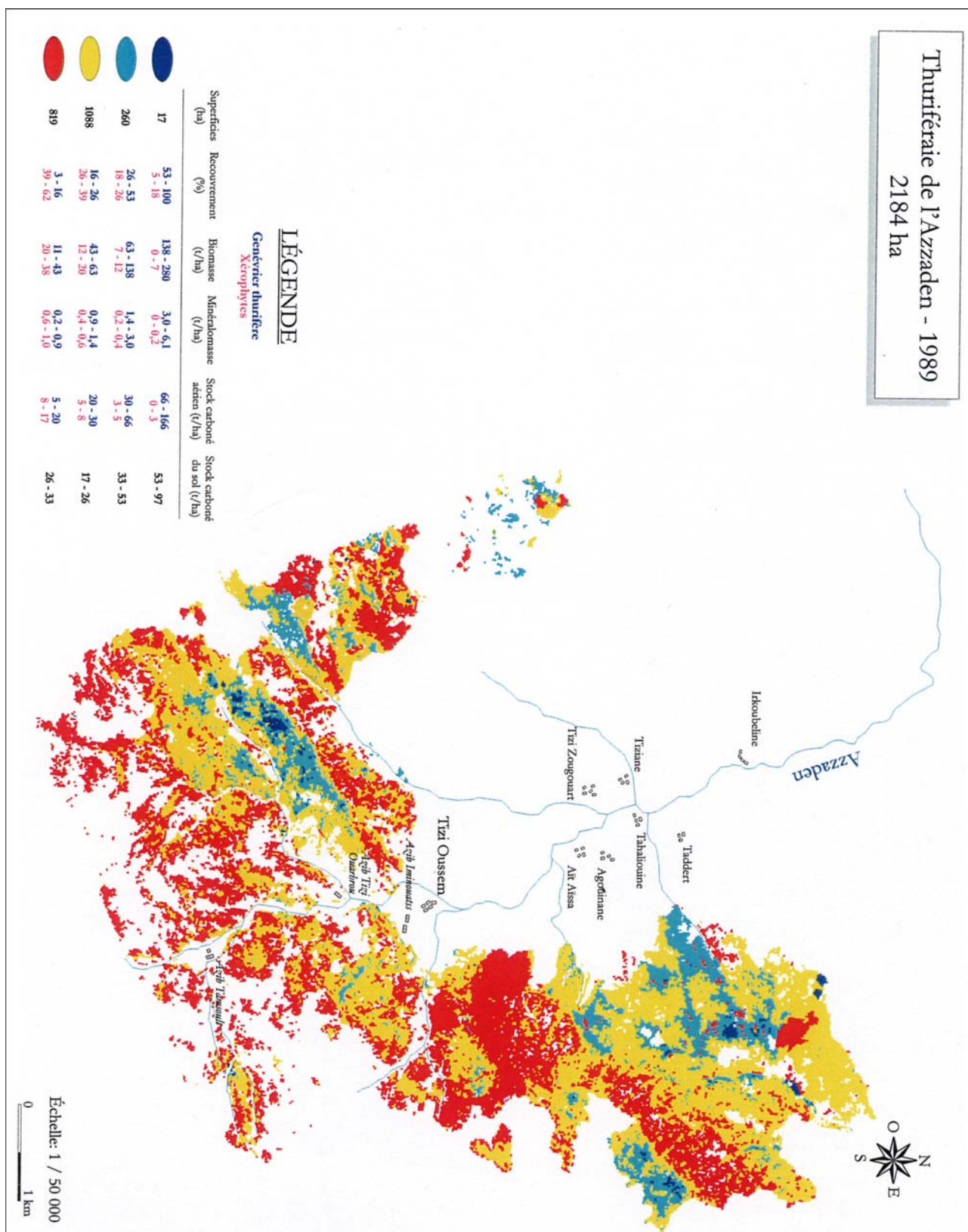


Figure 41

En terme de minéralomasse, la quantité d'éléments minéraux soustraits au cycle biogéochimique de l'écosystème est également importante (environ 700 tonnes, soit près de 30 t/an). Elle est cependant sous estimée, car la fraction contenue dans le sol, et que l'érosion a pu emporter, n'est pas prise en compte.

Les pertes de biomasse affectent directement le stock carboné aérien. Pour l'ensemble des espèces étudiées, et pour toute la thuriféraie, on peut estimer que le stock de carbone s'appauvrit d'environ 570 t/an, soit pour la période considérée, 13600 tonnes.

Concernant le stock carboné souterrain, les pertes consécutives au décapage des horizons superficiels riches en matières organiques, s'élèvent à près de 2200 tonnes (déduction faite du stock carboné hors couvert des zones déboisées).

Ainsi, le stock carboné total, aérien et souterrain, a diminué de près de 16000 tonnes sur les vingt-quatre années considérées.

3. CONCLUSION

L'évolution régressive de la Thuriféraie, mise en évidence par l'analyse d'images diachroniques, se traduit par une diminution estimée à 438 ha sur une période de 24 ans, répartie inégalement sur la vallée. Les secteurs les plus touchés par la déforestation sont essentiellement localisés sur la moitié est de la vallée, la zone en aval étant proche de plusieurs villages qui s'y alimentent en bois de chauffage, celle en amont faisant l'objet d'un pâturage intense.

Bien que nos estimations, basées sur la comparaison de supports très différents, soient empruntées d'un biais qu'il ne nous a pas été possible de calculer, nos conclusions sur la dynamique du peuplement semblent en accord d'une part avec la régression de la surface forestière au Maroc, et d'autre part avec nos observations de terrain ainsi que celles des botanistes qui ont parcouru cette vallée (Donadieu *et al.*, 1976; Hammoudi, 1977; Gauquelin, 1988; Ouhammou, 1996; Gauquelin *et al.*, 1998a).

La perte en biomasse que représente cette régression du peuplement peut être estimée à 1200 t/an, ce qui, en terme de minéralomasse, représente pour les éléments Ca, N, K et Mg, un déficit de 30 t/an.

Mais la disparition de la couverture arborée a comme autre conséquence une intensification des processus érosifs qui, en découpant les horizons superficiels ne laissent hors du couvert de l'arbre qu'un sol squelettique appauvri en matières organiques. Le stock carboné du sol s'en trouve donc diminué, ces pertes s'ajoutant à celle du stock carbone épigé. Il s'ensuit un appauvrissement en carbone, que l'on peut estimer pour l'ensemble de la Thuriféraie à 16000 tonnes sur la période 1965 – 1989.

La dynamique régressive de ce peuplement, perceptible sur une échelle de temps relativement courte, confirme les craintes formulées par de nombreux auteurs, quant au proche avenir de cet écosystème et des populations qui en dépendent.

Cette étude de l'évolution de la couverture arborée à travers l'analyse d'images diachroniques met donc en évidence non seulement l'intérêt d'un suivi temporel de la dégradation et de la structure de ces peuplements, mais également l'intérêt de ce type de formation comme modèle pour le suivi de la déforestation et de la steppisation des écosystèmes méditerranéen d'altitude, dont les processus ont été décrits par Barbero *et al.* (1990a & 1990b). En effet, le caractère monospécifique de la strate arborée de ce peuplement, ainsi que la faible représentativité de la strate chaméphytique génère un contraste spectral suffisant entre une tache élémentaire contenant un arbre et une tache élémentaire n'en contenant pas, pour une détermination précise de la densité du couvert.

Selon Joffre & Lacaze (1993), qui ont travaillé dans les dehesas espagnoles, la cartographie des couverts arborés clairs, basée sur l'information texturale déduite de données SPOT panchromatiques à haute résolution spatiale (10 m), est particulièrement adaptée au suivi temporel des densités d'arbres.

Ainsi, en l'absence d'une couverture par photographies aériennes récentes, permettant une cartographie individuelle des arbres telle qu'elle est pratiquée par certains auteurs (Reed *et al.*, 1989; Dralle & Rudemo, 1997; Boose *et al.*, 1998), le traitement de ce type de données pourrait permettre le suivi de la déforestation de ce peuplement, en localisant précisément les zones de prélèvement privilégiées.

5^{EME} PARTIE: ÉTUDE DES RELATIONS HOMME – THURIFERE

Lorsque l'on parcourt les hautes vallées de l'Atlas, deux éléments paysagers se détachent des pentes abruptes: les arbres et les villages, autrement dit l'Homme et la forêt. Dans la vallée de l'Azzaden, les liens qui unissent les Berbères au Genévrier thurifère sont multiples et témoignent de l'importance sociale et économique de cette essence dont dépend la survie de ces populations de montagne. Mais le rôle majeur du Genévrier thurifère dans le quotidien des villageois est aussi ce qui risque de causer sa perte, et par voie de conséquence, celle des villages de la haute montagne marocaine. Emberger en 1938 mettait déjà en garde: *"La montagne marocaine, si l'on y prend garde, court vers sa ruine définitive. La destruction de la végétation engendre la ruine économique, et celle-ci provoque la dépopulation."* Soixante ans plus tard, nous dressons le bilan, pour une vallée particulière, et discutons de l'avenir de ces forêts.

1. LES UTILISATIONS DU GENEVRIER THURIFERE

Que ce soit au Maroc, en Espagne ou en France, les nombreuses utilisations qui sont faites du Genévrier thurifère témoignent de l'important rôle social et parfois économique de cet arbre. Selon les régions et l'usage qui en est fait, les raisons qui poussent à s'intéresser à cette espèce peuvent être regroupées en quatre grandes catégories:

- Présence exclusive ou prépondérante de cet arbre au niveau local, seul capable de répondre aux besoins en matière de fourrage, de bois de construction ou de chauffage
- Symbolisme religieux et croyances populaires
- Propriétés physiques et chimiques de ce taxon
- Esthétique

Si en France, son utilisation tend à disparaître, en Espagne et au Maroc, elle est encore très présente et très diversifiée.

1.1. L'utilisation du Genévrier thurifère en Espagne

C'est en Espagne que les utilisations du Genévrier thurifère sont les plus variées, peut être en accord avec l'importance de la superficie qu'il y occupe. En premier lieu, les vertus médicinales du feuillage, connues de longue date, lui confèrent des propriétés émétiques, emménagogues et abortives (Lucas Santolaya, 1998; Villar & Fernandez, 1999). En médecine vétérinaire, outre l'utilisation des propriétés abortives, la confection d'un goudron par distillation sèche du bois permet son emploi comme cicatrisant et antiseptique (Lucas Santolaya, 1998).

L'odeur très forte du Genévrier thurifère, qui lui a donné son nom (Genévrier porte-encens), est à l'origine de multiples utilisations. Il est employé comme encens lors des cérémonies religieuses, et ses rameaux préalablement bénis, sont plantés dans les champs afin de protéger les semis des catastrophes naturelles (Lucas Santolaya, 1998). En ébénisterie, les armoires en genévrier thurifère sont très appréciées, l'odeur constituant un répulsif naturel contre les insectes. Considéré comme un bois précieux ("un des plus noble du monde" selon Lucas Santolaya, 1998), la dureté et l'imputrescibilité de cet arbre qui lui confèrent une grande longévité, et l'aspect noueux du bois, rendent le travail de l'ébéniste long et coûteux. Les meubles, parquets, fenêtres ou portes en genévrier thurifère (cf. Planche 4 p. 159, Photo n° 11) sont donc particulièrement onéreux.

Ces qualités d'imputrescibilité et de dureté sont également appréciées pour de nombreux usages, par exemple pour la confection de piquets pour les clôtures, de poteaux, de gouttières et de canaux qui ne nécessitent pas de traitement chimique préalable (Blanco Castro *et al.*, 1997; Lucas Santolaya, 1998, Gauquelin *et al.*, 1999). Nous avons d'ailleurs pu voir des clôtures dont les piquets étaient en terre depuis plus de 70 ans, les branches ayant conservé leur écorce (cf. Planche 4 p. 159, Photo n° 14). L'utilisation du Genévrier thurifère s'étend également aux poutres et aux charpentes (cf. Planche 4 p. 159, Photo n° 15), dont certains villages, comme celui de Calatañazor (région de Soria), en font un usage presque exclusif (cf. Planche 4 p. 159, Photo n° 12).

Dans un passé récent, la dureté du bois était mise à profit pour la fabrication d'essieux et de freins pour les chariots (Lucas Santolaya, 1998).

Une autre des qualités du bois de Thurifère est son haut pouvoir calorifique. Considéré comme un excellent bois de chauffage, il était très recherché par les bûcherons (Braun-Blanquet & De Bolos, 1957), et bien qu'il ne laisse pas de braises, il était également employé comme combustible dans les forges (Blanco Castro *et al.*, 1997).

Outre son bois, l'intérêt du Thurifère réside aussi dans son feuillage. Dans les secteurs à faible valeur pastorale, il est utilisé comme fourrage (Blanco Castro *et al.*, 1997; Lucas Santolaya, 1998; Bertrand & Bertrand, 1999) et parfois distribué comme complément minéral sous forme de poudre (Villar & Fernandez, 1999).

Employé également pour la fabrication de manches d'outils, de crayons, en sculpture (Villar & Fernandez, 1999) ou planté quelquefois comme arbre ornemental (Lucas Santolaya, 1998; Gauquelin *et al.*, 1999), on connaît à ce genévrier des utilisations plus marginales: fabrication de "gin" à partir des galbules, destiné à l'exportation vers la Hollande (Lucas Santolaya, 1998), ou encore fabrication, plus ancienne, de violons et de castagnettes (Blanco Castro *et al.*, 1997).

Enfin, la vitalité de cet arbre ainsi que les excellents résultats obtenus en matière de multiplication sexuée et végétative permet d'utiliser cette espèce comme essence de reboisement (Poblador Soler, 1999; Ruiz del Castillo *et al.*, 1999).

Bien que l'utilisation du Genévrier thurifère ait été évoquée pour la construction navale au 18^{ème} siècle (notamment des arbres provenant de la région des Monegros), cette utilisation semble aujourd'hui peu plausible (Blasco Zumeta, communication personnelle).

1.2. L'utilisation du Genévrier thurifère en France

L'utilisation actuelle du Genévrier thurifère en France est très restreinte et les différents usages que nous allons évoquer sont en fait liés à coutumes qui n'ont pratiquement plus cours de nos jours.

La plupart des usages qui étaient faits du Genévrier thurifère sont ceux que nous avons développés à propos de l'Espagne, et concernent essentiellement les Alpes. C'est le cas par exemple de l'utilisation médicinale de cet arbre, pour les propriétés emménagogues et abortives du feuillage (Lestra, 1921). En médecine vétérinaire, une décoction de galbules était employée comme insecticide contre les parasites des cochons (Archiloque & Borel, 1965).

Photo n° 11: Porte en Genévrier thurifère



Photo n° 12: Le Genévrier thurifère dans le village de Calatañazor (région de Soria)



Photo n° 15: Porche d'église



Photo n° 14: Clôture en Genévrier thurifère



Photo n° 13: Scierie dans la région de Soria



Cette fonction antiparasitaire et insectifuge était également mise à profit pour éloigner les parasites, les punaises et les mites des habitations (Fournier, 1948). Mais la forte odeur du Genévrier thurifère n'avait pas pour seule fonction d'éloigner les insectes, et selon Archiloque et Borel (1965), au moment de l'essaimage, les apiculteurs disposaient au voisinage des ruchers, des branches de Thurifère destinées à attirer les essaims.

Comme en Espagne, l'imputrescibilité du bois était reconnue et faisait du Thurifère un arbre idéal pour la fabrication des piquets (Widmann, 1950; Lathuillière, 1994a; Gauquelin *et al.*, 1999), ou des poutres et des charpentes (Gamisans & Gruber, 1979; Lathuillière, 1994a). Symbole de longévité, il était parfois planté dans les cimetières, ou encore comme arbre d'ornement (Lathuillière, 1994b).

Enfin, son feuillage sert encore occasionnellement de fourrage, mais uniquement en Corse (De Litardière, 1956; Conrad, 1986).

1.3. L'utilisation du Genévrier thurifère au Maroc

Dans la haute montagne marocaine, la faible diversité floristique et l'isolement géographique ont conduit les berbères à gérer au mieux les ressources disponibles dans le milieu. Dans le domaine de la santé par exemple, ces petits villages ("Douars") n'ont pas de médecin, ce dernier passant de villages en villages avec une périodicité variable. Lors de l'une de nos missions à Tizi Oussem, un homme fut grièvement blessé d'un coup de couteau, la police arrivant deux jours plus tard ...avant le médecin. En cas d'accident grave, seule la médecine traditionnelle peut donc tenter de sauver l'infortuné. Ainsi, c'est dans ces villages retirés que la pharmacopée marocaine traditionnelle, très présente dans tout le Maroc, est la plus employée (Bellakhdar, 1997). Les principes actifs du Genévrier thurifère en font donc un arbre particulièrement important, que ce soit pour un usage vétérinaire ou médical. Localement, la distillation sèche du bois fournit un goudron aux propriétés cicatrisantes et antiseptiques employées en médecine vétérinaire (Fromard & Gauquelin, 1993). Cependant, suite aux interdictions de prélèvement, ce goudron n'est plus fabriqué dans la vallée depuis 15 à 20 ans (il est encore produit dans le Moyen Atlas) (cf. Planche 5 p. 162, Photo n° 17). A l'Azzaden, les villageois nous ont affirmé mâcher les galbules pour calmer les maux de dents, tandis que dans le Moyen Atlas (Aguelmane Sidi Ali), c'est pour arrêter les saignements de gencives (Bellakhdar, 1997).

Mais le Genévrier thurifère a bien d'autres utilisations qui en font un élément clé de la survie des populations de haute montagne. Dans une vallée aux hivers rigoureux, il constitue la principale ressource en bois pour le chauffage et la cuisine, tant pour le foyer au village, que pour le berger dans la montagne (Emberger, 1938; Boudy, 1958; Auclair, 1991; Gauquelin *et al.*, 1999). En revanche, il n'est pas employé sous forme de charbon car les villageois nous ont rapporté qu'il en produit peu et se fissure très facilement.

En bois d'œuvre, il est actuellement peu employé en raison des interdictions, et du fait que c'est un bois difficile à travailler, et ce d'autant plus qu'ils sont peu outillés. De plus, il est rarement utilisé pour confectionner des ustensiles de cuisine tels que bols, plats ou assiettes, car son bois se fend en séchant et souvent se tord. Il est donc principalement utilisé pour réaliser des charpentes, des linteaux et quelques portes, dont celle déjà ancienne de la mosquée de Tizi Oussem (cf. Planche 5 p. 162, Photo n° 16 et Photo n° 18). Cependant, les habitants nous ont confié que par le passé, il avait fait l'objet d'une exploitation intense pour la réalisation d'armoires, de meubles et d'objets de décoration. Ainsi, dans les années 60, les plus fortunés des Juifs marocains du Mellah de Marrakech, embauchaient des ouvriers pour couper des Thurifères durant une à deux semaines dans la vallée.

Actuellement, les branches entremêlées du Genévrier thurifère disposées sur les murs des Azib (bergeries), sont utilisées pour protéger le troupeau des renards et des chiens errants (cf. Planche 5 p. 162, Photo n° 19). Il y a une quinzaine d'années, de la viande empoisonnée remplissait cet office, mais elle a dû être abandonnée en raison d'une augmentation de la mortalité des oiseaux charognards, dont certaines espèces font l'objet d'une protection.

Comme le bois, le feuillage du Genévrier thurifère tient une place capitale dans l'économie montagnarde. Utilisé comme fourrage, il est consommé frais et sur place, les chèvres n'hésitant pas à monter dans ou sur la couronne de l'arbre, lorsque ce dernier n'est pas émondé par le berger (Donadieu *et al.*, 1976; Hammoudi, 1977; Auclair, 1991; Bellakhdar, 1997; Bourbouze, 1997; Gauquelin *et al.*, 1999). Mais le feuillage est également consommé sec, lorsqu'en hiver, les conditions climatiques confinent les troupeaux dans la bergerie, le thurifère étant alors un aliment d'appoint indispensable.

Enfin, si l'odeur pénétrante de cet arbre lui confère, en Espagne, un rôle protecteur symbolique à l'égard des cultures, les habitants de la vallée lui attribuent ici un rôle purificateur des sols. Symbole de force et de sagesse, certains Thurifères sont considérés comme de véritables "marabouts", appelé d'ailleurs "Agouram Androman" (marabout-thurifère), abritant les esprits protecteurs et éloignant les maladies (Auclair, 1993).



Photo n° 17: Distillation du Genévrier thurifère pour la fabrication du goudron (Moyen Atlas) (Photo J. M. Savoie)

Photo n° 16: Porte de la mosquée de Tizi Oussem (vallée de l'Azzaden)

Photo n° 18: Encadrement de fenêtre (Vallée de l'Azzaden)



Photo n° 19: Bergerie ("Azib") de la vallée de l'Azzaden (Azib Tamsoult)



2. LES BESOINS EN BOIS ET LES RESSOURCES DISPONIBLES: BILAN

Au Maroc, l'importance économique et sociale de la biomasse combustible est considérable. La consommation de bois de feu y représente 30% du bilan énergétique national dont plus de 80% correspond à la consommation en milieu rural (Auclair, 1991). L'importance des besoins au niveau national souligne la nécessité de préciser l'impact des prélèvements de bois de feu sur la couverture végétale, dans un pays où, selon la FAO, le déficit en bois de feu rapporté à la population rurale, est l'un des plus important parmi les pays du Maghreb.

2.1. Évaluation des besoins en combustible

L'estimation des prélèvements de bois de feu sous-entend la connaissance de deux paramètres: le nombre de personnes susceptibles de s'approvisionner dans la zone d'étude, et la consommation journalière ou annuelle par personne ou par foyer.

Les données démographiques disponibles sont hélas soit précises mais trop anciennes, soit très récentes mais trop régionales. Nous avons donc choisi comme document de base une étude démographique ancienne ciblée sur les villages de la vallée de l'Azzaden (Hammoudi, 1977), que nous avons tenté de réactualiser. Pour cela, nous avons utilisé les données de taux d'accroissement annuel moyen de la population, provenant de deux sources différentes, là encore, l'une ancienne mais ciblée sur la vallée (Hensens, 1975 *in* Hammoudi, 1977) l'autre récente mais moins locale du *Programme des Nations Unies pour le Développement - Royaume du Maroc* (1997).

Selon Hammoudi, en 1975, la population totale de la vallée était estimée à 1244 personnes, soit 187 foyers répartis dans 10 villages ou hameaux: Tizi Oussem, Aït Aïssa, Agouinane, Taddert, Tahaliouine, Irkoubeline, Azerfsane, Tizi Zougouart, Tiziane et Aït Ouissadene. Sur ce total, nous avons considéré, compte tenu de la localisation géographique de chacun d'eux, que seulement cinq d'entre eux utilisent régulièrement le Genévrier thurifère. Ce sont les villages de la rive droite: Tizi Oussem, Aït Aïssa, Agouinane, Taddert et Tahaliouine, regroupés sur trois domaines pastoraux. Les autres villages ou hameaux, situés principalement sur la rive gauche ou loin en aval, s'approvisionnent de préférence dans l'iliciaie, située entre la

rivière et la partie occidentale de la Thuriféraie. Leurs prélèvements sur le Genévrier thurifère sont donc plus faibles.

Ces cinq villages représentaient, en 1975, une population de 761 personnes, soit à raison de 6 à 7 personnes par foyer, un total de 117 foyers.

Pour estimer la population actuelle, nous avons choisi de faire une moyenne entre le résultat obtenu en utilisant le taux d'accroissement annuel moyen de 0,9% donné par Hensens (1975) et celui de 2% donné par le *Programme des Nations Unies pour le Développement - Royaume du Maroc* (1997). Ainsi, nous pensons être au plus proche de la réalité car aucun de ces deux taux d'accroissement annuel ne nous semblait suffisamment fiable. En effet, le premier a été mesuré précisément sur les villages qui nous intéressent, mais ces données sont déjà anciennes (période 1960-1971). Le second concerne la période 1982-1994, mais correspond au taux d'accroissement annuel moyen de la commune de Ouirgane (sur laquelle se trouve la vallée), que Hensens en 1975 estimait supérieur à celui de la vallée.

Selon la première estimation (taux d'accroissement annuel moyen de 0,9%), la population totale actuelle des cinq villages étudiés serait de 944 personnes, tandis que la seconde estimation (taux d'accroissement annuel moyen de 2%) porte ce chiffre à 1224 personnes.

Nous utiliserons donc pour cette étude le chiffre moyen de 1085 personnes, soit environ 170 foyers.

Dans tout le Maroc rural, et à de très rares exceptions près, la collecte de bois ("Zdem") est une activité féminine (cf. Photo n° 20). C'est le cas dans la vallée de l'Azzaden, où le transport des charges se fait presque exclusivement "à dos d'homme". Le plus souvent, les femmes partent par petit groupe, afin de s'entraider au moment de hisser le fardeau sur le dos, lequel peut atteindre plus de 50 kg. Le retour au village, situé souvent à plusieurs kilomètres, se fait généralement au pas de course, pour éviter d'être aperçues par les agents forestiers, avec ce chargement compromettant. Il faut avoir souffert des fortes pentes de cette vallée, et avoir glissé à maintes reprises sur ces schistes instables, pour prendre toute la mesure de l'exploit physique qu'elles réalisent quotidiennement, quand nous, avec nos sacs à dos aux bretelles confortables, portons des charges moitié moins lourdes que les leurs. Mais leur travail n'est pas sans risque, et dans certaines vallées, on enregistre certains accidents mortels (Auclair, 1991).



Photo n° 20: Collecte de bois dans la vallée de l'Azzaden

A raison de 120 chargements de 50 kilos de bois, les femmes ramènent annuellement environ 6 tonnes de bois pour un foyer de 6 à 7 personnes (Donadieu *et al.*, 1976; Hammoudi, 1977). Bien que de sources anciennes, ces estimations peuvent être considérées comme d'actualité, car les comportements énergétiques ont peu évolués. En effet, la consommation de butane reste très limitée, car la piste ne dessert pas encore tous les villages (Tizi Oussem notamment), et les faibles revenus des habitants ne leur permettent pas d'en acquérir (selon Auclair, en 1991 le butane représentait moins de 10% de l'énergie thermique utile consommée dans les villages de montagne). Le combustible ligneux, gratuit, reste donc la principale ressource énergétique des villages de montagne.



La consommation en bois de chauffage des cinq villages peut donc être estimée à environ 1020 t/an, ce chiffre pouvant être porté à 1100 t/an si on y ajoute la consommation en bois des hammams (20 t/an pour le village de Tizi Oussem selon Hammoudi, 1977), et celle de bois d'œuvre. On peut donc considérer que les besoins en bois sont approximativement de 1 t/an/personne (1100 tonnes pour 1085 habitants).

Photo n° 21: Un Genévrier thurifère mutilé par la hache

2.2. Bilan et prévisions de l'évolution des stocks de bois disponibles

Si nous rapprochons les résultats de la biomasse ligneuse du peuplement (plus de 140 000 t), exposés dans le chapitre 2 (p. 18), des prélèvements de bois que nous venons d'estimer (1100 t/an), on peut remarquer que les besoins annuels représentent un peu moins de 1% du stock total. Si l'on tient compte maintenant de la productivité actuelle de la Thuriféraie (environ 4820 t/an), on peut noter qu'à elle seule, elle couvre largement les besoins annuels en bois de la population. Si bien que l'on peut se poser la question: la Thuriféraie est-elle réellement menacée par les prélèvements de bois ?

L'étude de l'évolution des superficies obtenues après comparaison des cartes de 1965 et 1989 ("synthèse cartographique et approche diachronique de l'évolution de la Thuriféraie entre 1965 et 1989", p. 141) nous apporte un début de réponse. En effet, d'après ces cartes, la Thuriféraie régresserait annuellement d'environ 18 ha, soit une perte totale de biomasse que nous avons estimée à 1200 tonnes, dont 860 tonnes de Thurifère. Or cette perte de biomasse par déforestation est voisine de notre estimation des prélèvements de bois annuels par la population (1100 tonnes). Cette constatation tendrait donc à montrer que l'approvisionnement en bois des villages n'est pas homogène sur le peuplement, mais se concentre sur des zones restreintes, conduisant aux phénomènes de déforestation mis en évidence. Ceci semble confirmé par l'observation de l'évolution des surfaces évoquée dans l'étude diachronique (p. 141). En effet, pour que la productivité ligneuse (2,2 t/ha/an) équilibre les pertes (évitant de ce fait de prélever sur le stock disponible) la récolte annuelle de bois doit s'effectuer sur une superficie supérieure à 500 ha. Dans le cas contraire, on assiste à une érosion des surfaces qui se traduit par une diminution de la productivité globale de la Thuriféraie.

Pour évaluer les conséquences à plus ou moins long terme de ce mode d'exploitation, nous avons tenté de modéliser l'évolution des réserves ligneuses de la vallée. Pour ce travail, nous avons introduit dans le modèle les paramètres suivants: la productivité ligneuse moyenne de l'écosystème, la biomasse ligneuse, le nombre de pieds du peuplement, la surface totale du peuplement, la croissance démographique et les prélèvements de bois.

Les prélèvements de bois:

Ne possédant pas de données de productivité sur les xérophytes, nous les avons écartées du modèle, pour nous intéresser uniquement au Genévrier thurifère, qui représente la principale source de combustible. La première étape consiste donc à déduire des prélèvements précédemment estimés, la part des xérophytes. Pour cela, nous avons eu recours aux travaux d'Auclair (1991), qui s'est intéressé à la composition des chargements de bois dans deux villages de haute montagne du Haut Atlas, présentant des groupements végétaux similaire aux nôtres (genévriers thurifères et xérophytes). Selon cet auteur, les xérophytes représenteraient environ 3,2% de la biomasse du combustible. Ainsi, sur un total de 1100 tonnes, les prélèvements annuels de bois de Thurifère peuvent être estimé à 1065 tonnes. Pour estimer l'évolution de ces prélèvements de bois dans le temps, il nous faut maintenant nous intéresser à la croissance démographique.

L'évolution de la démographie de la vallée:

Comme nous l'avons déjà vu, la population des cinq villages qui nous intéressent est estimée actuellement à 1085 habitants. Pour notre projection démographique, nous nous sommes basé:

- Pour la période antérieure à 1975, sur le taux d'accroissement annuel moyen de 0,9% donné par Hensens (1975).
- Pour la période comprise entre 1975 et 1999, sur la moyenne du taux de Hensens 1975 (0,9%) et du *Programme des Nations Unies pour le Développement - Royaume du Maroc* (1997) (2% pour la période 1982 – 1994).
- pour la période au-delà de 1999 sur le taux d'accroissement annuel moyen donné dans le rapport du *Programme des Nations Unies pour le Développement - Royaume du Maroc* (1997), estimé à 0,4%. Ce taux est inférieur à celui que nous avons utilisé pour estimer la population actuelle, car ce rapport prévoit, sur la période 2000-2010, un ralentissement de la croissance démographique des communes rurales au profit des centres urbains (exode rural).

Les hypothèses de départ:

Pour faire fonctionner ce modèle, nous avons émis plusieurs hypothèses préalables:

- Certaines valeurs sont considérées comme des constantes, et déterminées à partir des données issues de notre échantillonnage: c'est le cas de la biomasse ligneuse moyenne (0,592 tonnes/arbre), de la densité moyenne du peuplement (78,4 arbres/ha) et de la productivité moyenne du peuplement (2,2 t/ha).
- La régénération naturelle du peuplement a été considérée comme nulle, ce qui d'une part simplifie le modèle, et d'autre part traduit une certaine réalité.

Tous les paramètres étant définis, on peut maintenant les inclure dans notre modèle que l'on peut résumer par la formule suivante:

$$R_{n+1} = \left(S_n - \frac{H_n \times C}{B \times D} \right) \times [(B \times D) + P]$$

Où: R_{n+1} : Réserve ligneuse de l'année n+1 (tonnes)

S_n : Superficie de la Thuriféraie de l'année n (ha)

H_n : Nombre d'habitants de l'année n

C : Consommation annuelle de bois par habitant (tonnes)

B : Biomasse ligneuse moyenne d'un arbre (tonnes)

D : Densité moyenne du peuplement (arbres/ha)

P : Productivité ligneuse annuelle par arbre (t/ha/an)

Si l'on souhaite donc connaître la réserve ligneuse en l'an 2000, la formule nous donne:

$$R_{2000} = \left(2011 - \frac{1138 \times 0,98}{0,592 \times 78,4} \right) \times [0,592 \times 78,4 + 2,2]$$

d'où:

$$R_{2000} = 96638 \text{ tonnes}$$

Le but de cette modélisation étant d'étudier les effets à long terme de la collecte de bois telle qu'elle est pratiquée actuellement, sur l'évolution du réservoir ligneux de la vallée, nous avons fait fonctionner le modèle jusqu'à la disparition complète de la Thuriféraie. Nous sommes parti de 1965, date pour laquelle nous connaissions la surface du peuplement, afin de tester le modèle en comparant l'estimation de l'année 1989 avec la surface mesurée sur l'image SPOT. Le résultat de cette simulation est présenté sur la Figure 42.

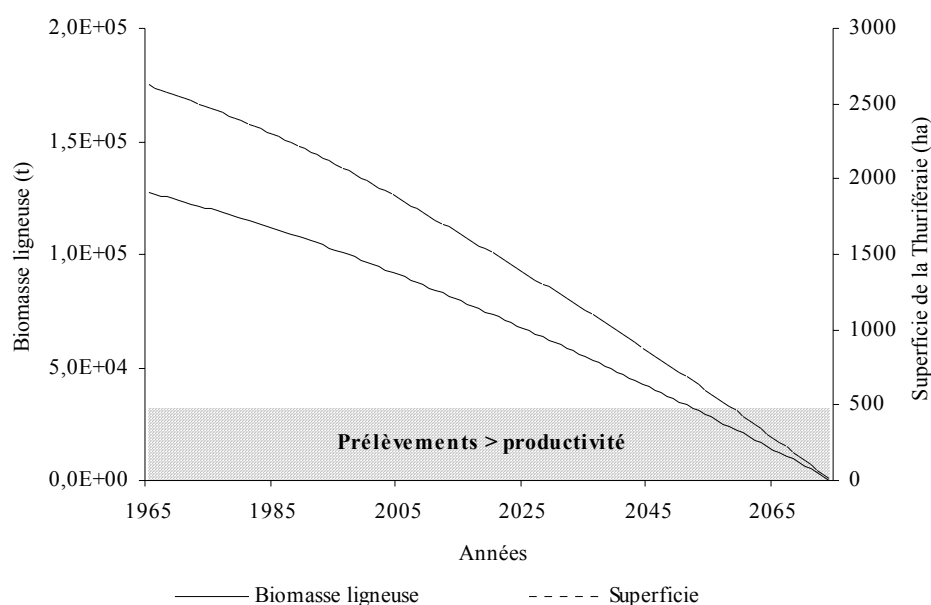


Figure 42: Modèle prédictif d'évolution de la Thuriféraie

Les données que nous fournit le modèle sur la biomasse ligneuse totale et la surface de la thuriféraie en 1989 nous permet d'espérer une relativement bonne fiabilité du modèle. En effet, pour une superficie estimée sur l'image SPOT à 2184 ha, le modèle nous donne une superficie de 2221 ha, soit une erreur de moins de 2%. En terme de biomasse ligneuse, cette erreur atteint seulement 6%.

Si l'on s'intéresse maintenant à l'avenir de la Thuriféraie, le scénario proposé par le modèle est terriblement inquiétant puisqu'il prédit la disparition totale de la Thuriféraie d'ici 75 ans. Bien sûr, cette modélisation ne tient pas compte de tous les paramètres pouvant influencer le devenir de ce peuplement. Cependant, nous ne pensons pas avoir surestimé les facteurs de dégradation ou sous estimé la réserve ligneuse du peuplement. Par exemple, la productivité

est basée sur un accroissement radial annuel de 1 mm, ce chiffre étant probablement légèrement surestimé (Bertaudière, communication personnelle). De même, l'accroissement démographique calculé est très faible, en accord avec les observations des différents auteurs ayant travaillé dans cette vallée (Hensens, 1975; Hammoudi, 1977). L'exclusion des villages les plus éloignés de la Thuriféraie évitent également une surestimation des prélèvements. Ce scénario, même si ce n'est qu'un scénario, est sûrement perfectible, mais dessine une tendance que les observations de terrain tendent à confirmer. En outre, notre modèle reste relativement "optimiste" si l'on se réfère aux travaux de Lillelund & Staatsen (1986) (*in* Auclair, 1991), qui prévoient, au rythme actuel des déboisements, la disparition des forêt et matorrals du Rif et du Haut Atlas Central à l'horizon 2020.

Cependant, nous avons vu que la productivité ligneuse de l'écosystème n'est pas négligeable, et même supérieure aux besoins de la population.

Si nous envisageons maintenant des prélèvements répartis de façon homogène sur tout le peuplement, alors, la productivité des arbres devient supérieure aux prélèvements de bois. Le bilan annuel révèle alors une augmentation de la biomasse globale de la Thuriféraie (Figure 43).

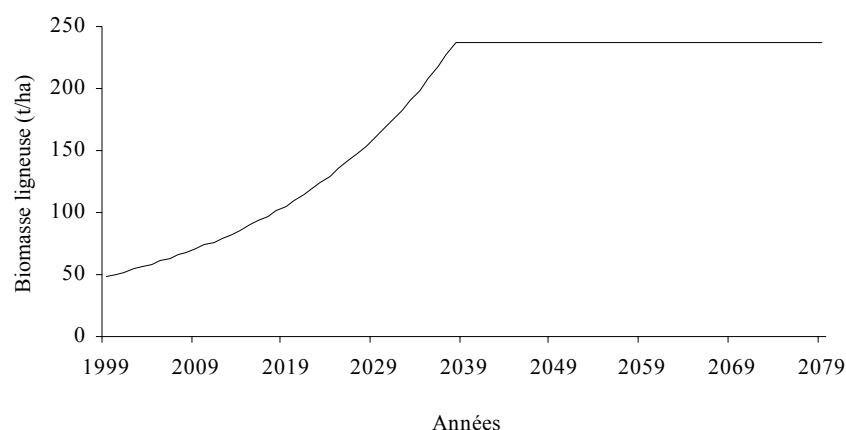


Figure 43

Bien entendu, cette augmentation est limitée par l'absence de régénération. C'est pour cette raison que nous avons limité la biomasse maximale du peuplement à environ 240 t/ha, ce qui constitue un chiffre très optimiste puisqu'il suppose, avec une densité d'arbre de 78,4 arbres/ha, une biomasse moyenne par arbre de 3 tonnes. Ce qui importe, c'est donc plus le principe de l'augmentation que l'augmentation elle-même. Le problème de la thuriféraie de

l'Azzaden ne semble donc pas venir de la quantité de bois prélevée, mais plus de la façon dont il est prélevé et de la régénération naturelle du peuplement.

En attendant des résultats significatifs dans les tentatives de régénération de cette espèce, il serait donc peut être souhaitable de réorganiser ou plutôt d'organiser la collecte du bois dans ces villages. Mais les problèmes que soulèvent de telles mesures sont souvent rédhibitoires. En effet, les charges importantes que transportent les femmes (entre 40 et 50 kg), ainsi que le relief accidenté de la vallée, les conduit à s'approvisionner à proximité du village. Comment dans ce cas leur demander de parcourir des distances plus importantes, d'autant plus que les territoires pastoraux de chaque village sont jalousement gardés. En outre, organiser la collecte du bois au niveau local, c'est reconnaître implicitement l'usage qui est fait du Thurifère, ce que ni l'administration des Eaux et Forêts, ni la population locale ne sont prêts à admettre, car même si les gardes forestiers ne sont pas dupes, les prélèvements restent officiellement interdits.

Le problème de la gestion des ressources de cet écosystème montagnard méditerranéen se heurte donc à l'incompréhension entre une population dont le principal souci est de se chauffer en hiver et d'alimenter le troupeau, et les agents forestiers qui tentent de faire appliquer des décisions administratives souvent prises sans suffisamment de concertation avec les populations locales.

Mais si l'interdiction de couper du bois à des populations dont c'est pratiquement le seul combustible illustre bien cette mésentente, la protection de la faune sauvage en est un autre exemple. L'interdiction de chasser les sangliers a en effet conduit à une multiplication rapide de ce suidé, qui en quelques années est devenu un fléau pour les agriculteurs (Bourbouze, 1997). Les paysans ne possédant pas de fusils, seule l'organisation de tours de garde nocturnes permet de tenir ces animaux à distance. Cette inadéquation entre le code forestier et les problèmes qu'il est censé résoudre ne se limite pas seulement à cette petite vallée, des problèmes identiques étant rencontrés, par exemple, dans le Maroc présaharien (Buttoud, 1994).

Le principe de domanialité des forêts, dans lequel Boudy & Emberger en 1934 voyaient un instrument efficace de lutte contre la déforestation, montre aujourd'hui ses limites, à travers, selon Bourbouze (1997), "une mauvaise gestion par une population déresponsabilisée et privée de tout pouvoir de décision sur son espace", d'autant plus que cette domanialité est encore vivement contestée comme en témoigne le sens de certaines poésies:

*"Comme si la forêt était bien du Makhzen (de l'État)
Et non propriété immémoriale des gens de Taselli
Nous nous inclinons devant la rigueur d'une loi
Une loi dénuée de bon sens et violant nos coutumes"*

Les chants de la Tessaout
in Auclair (1993)

Toutes mesures destinées à préserver cet écosystème devrait donc impérativement être le résultat d'un consensus entre les autorités locales et les populations concernées. Dans ces milieux plus qu'ailleurs, le lien étroit qui lie les villageois à leur environnement doit faire prendre conscience qu'ils font partie intégrante de la biocénose, et que préserver l'écosystème, c'est aussi préserver les intérêts économiques et sociaux des populations qui en dépendent.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

A travers cette étude, nous avons tenté, dans un premier temps, de dresser un bilan écologique permettant d'une part de préciser les potentialités et les ressources de cet écosystème méditerranéen de haute montagne dans le cycle du carbone et des éléments minéraux, et d'autre part, de déterminer le rôle du facteur anthropique dans les processus de dégradation des sols et de la végétation, ainsi que dans les difficultés de régénération naturelle du *Genévrier thurifère*.

Compte tenu de l'état de conservation alarmant de ces écosystèmes, nous nous sommes donc interrogés sur le rythme de dégradation des forêts d'altitude au Maroc. Partant du constat que la déforestation y est principalement le fait de prélèvements de bois de feu, nous avons cherché à répondre tout d'abord à ces deux questions: Quel est le potentiel ligneux du peuplement et quels sont les besoins énergétiques de la population ?

Dans un milieu sévèrement touché par la dégradation, et dans lequel les prélèvements de bois sont interdits par les agents forestiers, la réponse à la première question sous-entendait le développement d'une méthodologie originale permettant une estimation de la phytomasse sur pied du *Genévrier thurifère* qui soit non destructive. L'architecture souvent très complexe du *Genévrier thurifère* nous parût être un élément décisif dont il fallait tenir compte pour espérer obtenir des résultats précis. Ces considérations nous ont donc amenés à baser notre approche méthodologique sur un échantillonnage photographique des individus, qui nous a permis, après traitement, d'obtenir une reconstitution informatisée du volume de chacun des compartiments de l'arbre. Le passage du volume des compartiments à leur poids respectif, obtenu après détermination de la densité apparente de chacun d'eux, a permis une estimation très précise de la phytomasse, mais également de la minéralomasse et du stock carboné. Dans un deuxième temps, cette étude a été complétée par une approche de la phytomasse des xérophytes qui se trouvent en mélange avec le *Thurifère*. En dépit de la faible densité d'arbres (78 pieds par hectare), des conditions climatiques très contraignantes, du pâturage et des prélèvements de bois par la population, la phytomasse déterminée apparaît relativement importante, atteignant en moyenne 49 t/ha. Le compartiment ligneux représentant plus de 90% de cette valeur, la réserve ligneuse est d'environ 46 t/ha. Il ressort donc que le potentiel

ligneux de cette petite vallée est important, comme nous l'a confirmé l'estimation de la productivité ligneuse (2,2 t/ha).

Ainsi que nous l'avons montré, cette forte productivité semble être en relation avec la structure pluri-caulinaire des arbres. Ceci nous a donc amené à nous interroger sur la nature du déterminisme intervenant dans l'architecture de ces genévriers. Les résultats obtenus concernant la variabilité morphotypique semblent indiquer que plusieurs facteurs interviennent, seuls ou en synergie: la forme pluri-caulinaire semble induite à la fois par des facteurs endogènes, et par la dégradation. Ce morphotype serait en effet le résultat d'une faible dominance du bourgeon apical, à la fois d'origine génétique, et d'origine anthropique (mutilation de l'axe principal). Les autres types architecturaux que nous avons décrits seraient sous l'influence de facteurs endogènes (âge), ou exogènes (altitude et dégradation anthropique), mais sur ces arbres dioïques, aucun déterminisme sexuel n'a été mis en évidence. Il est à noter que sur les six morphotypes décrits, quatre sont des formes de dégradation, illustrant l'empreinte de l'Homme dans le paysage, et témoignant de l'intense exploitation des ressources du milieu, à la fois pour le pâturage et pour la collecte du bois (bois de feu et bois d'œuvre essentiellement).

Les prélèvements de bois par la population concernent principalement le Genévrier thurifère, les xérophytes utilisées comme combustible d'appoint, ne représentant qu'un peu plus de 3% des prélèvements. Ainsi, ce sont environ 1065 tonnes de bois qui sont prélevées annuellement dans la Thuriféraie. Or, avec une superficie estimée à 2184 ha, la productivité totale actuelle du peuplement a pu être évaluée à environ 4800 t/an. Ces résultats ont donc soulevé une nouvelle interrogation: si la productivité ligneuse de l'écosystème est supérieure aux prélèvements, la Thuriféraie court-elle réellement un danger ?

Pour répondre à cette question, nous avons eu recours à l'analyse d'images diachroniques: une photographie aérienne de 1965 et une scène SPOT de 1989. La comparaison des cartes de densité de couvert issues de ces documents nous a révélé une diminution de la superficie de la Thuriféraie de 438 ha au cours de ces 24 années. La perte de biomasse que représente cette déforestation a été estimée à 1200 t/an, dont 860 tonnes de Thurifère, et le reste en xérophytes. Cette valeur étant voisine de l'estimation des prélèvements annuels précédemment évoqués, nous en avons déduit que la collecte de bois devait s'effectuer sur des secteurs restreints, dans lesquels la productivité n'est alors plus suffisante pour équilibrer les prélèvements, conduisant ainsi à la déforestation. Cette hypothèse s'appuie également sur la comparaison des surfaces des cartes de 1965 et 1989 mettant en évidence que la régression du

peuplement n'est pas homogène, mais semble concerner les zones situées à proximité des villages et des bergeries. En l'absence de régénération suffisante, ce type de prélèvements constitue donc une menace sérieuse pour l'écosystème. Annuellement, on peut estimer que 18 ha de thurifères disparaissent, ce qui représente 29 tonnes d'éléments minéraux (Ca, K, Mg et N), 567 tonnes de carbone organique pour la partie épigée de l'écosystème, et environ 90 tonnes de carbone pour le sol. Les conséquences de telles pertes se situent à plusieurs niveaux: d'abord au niveau du cycle du carbone lui-même, qui enregistre un déséquilibre du stock carboné souterrain (27 t/ha) étudié par ailleurs, par rapport au stock carboné épigé (31 t/ha), en relation avec les phénomènes érosifs qui s'expriment plus intensément lorsque les arbres disparaissent. Mais aussi à un niveau plus global, où la disparition progressive de la Thuriféraie de la vallée de l'Azzaden s'inscrit dans une dynamique régressive générale de la capacité de stockage du carbone des écosystèmes méditerranéens. De ce point de vue, les données du stock carboné passé, présent et futur présentées dans cette étude, permettent de fournir des résultats nouveaux pour ce type d'écosystème, indispensables à la modélisation des variations du réservoir continental des formations méditerranéennes pré-steppiques.

Compte tenu des éléments en notre possession, nous nous sommes livrés à une modélisation de l'évolution de la Thuriféraie en tenant compte de plusieurs facteurs: réserve ligneuse actuelle, productivité ligneuse, besoins en bois par habitant et croissance démographique. Le résultat est très inquiétant, puisque sur la base des prélèvements actuels et avec le même type d'exploitation, le modèle prévoit la disparition de la Thuriféraie d'ici 75 ans.

Mais, nous avons pu montrer que cette situation n'est pas irrémédiable. Le problème ne proviendrait pas de la réserve ligneuse disponible, mais de son mode d'exploitation. La productivité ligneuse de la Thuriféraie semble indiquer que cet écosystème est capable de fournir le bois nécessaire à l'approvisionnement de la population, à condition que les prélèvements s'effectuent de façon homogène sur tout le peuplement, afin que la productivité individuelle des arbres dépasse la quantité de bois qui leur est prélevée annuellement. Mais même si l'on fait abstraction des difficultés que rencontrerait la mise en place d'une telle gestion, cette solution ne saurait résoudre à elle seule le problème de la disparition du Thurifère. Tout au plus peut-elle faire gagner du temps, ce qui serait déjà précieux. Car le problème du déclin de la Thuriféraie ne se limite pas à celui des prélèvements de bois ou du pâturage. L'absence quasi totale de régénération est très préoccupante et doit faire l'objet d'études approfondies dans les plus brefs délais. Les études de minéralomasse que nous avons

menées ont mis en lumière le rôle potentiel des xérophytes dans les processus de régénération du Thurifère, ainsi que leur rôle de protection à l'égard des plantules. La richesse en éléments minéraux de leur appareil épigé (notamment azote et potassium, tous deux impliqués dans la production de galbules) leur confère un rôle de "concentration" des bioéléments, assurant par le cycle biogéochimique, des qualités trophique au sol supérieures, ce que devraient vérifier dans l'avenir, l'analyse du sol sous leur couvert. Ajouté à leur fonction de "plantes nurses", ces chaméphytes pourraient alors dans une certaine mesure, assurer, dans la régénération du peuplement, un rôle "normalement" dévolu au couvert des genévriers aujourd'hui bien altéré, et à ce titre, doivent donc être considérées comme un acteur fondamental du maintien des capacités nutritionnelles et reproductrices de cet écosystème. Mais en amont du problème de la préservation des plantules se pose celui de la germination, car sa maîtrise est indispensable si l'on veut pouvoir un jour envisager la restauration des forêts de genévriers thurifères.

Longtemps considérées comme des "forêts de protection", et de ce fait peu étudiées du point de vue de leur productivité, l'intense dégradation dont font l'objet ces peuplements de genévriers thurifères et la croissance relativement lente de cette espèce a souvent conduit à considérer ces écosystèmes comme des forêts peu productives. Au contraire, cette étude nous montre que d'une part, elles assurent un rôle de production fondamental dans l'économie des hautes vallées, et que d'autre part, leur fonctionnement est particulièrement performant, comme en témoigne leur réserve ligneuse qui est loin d'être négligeable.

Au-delà de la portée locale d'une recherche ciblée sur une espèce menacée de disparition à court terme, et des implications écologiques, économiques et sociales de la déforestation d'une petite vallée du Haut Atlas, cette étude relève d'une problématique plus générale. La vallée de l'Azzaden peut, en effet, être considérée comme un modèle de fonctionnement d'un écosystème méditerranéen perturbé par l'action anthropique, les données obtenues renseignant plus généralement sur les problèmes globaux de la steppisation, du pâturage, de l'épuisement des ressources énergétiques, de l'érosion des sols et des variations du stock carboné des milieux semi-arides de montagne.

L'apport méthodologique relatif à l'estimation non destructive de la phytomasse, ouvre des perspectives d'étude sur des espèces ou des milieux protégés ou menacés, sur lesquels on peut désormais obtenir des données précises de biomasse, minéralomasse, productivité et stock carboné, sans préjudice pour l'écosystème.

BIBLIOGRAPHIE

- ACHHAL A., AKABLI O., BARBERO M., BENABID A., M'HIRIT A., PEYRE C., QUÉZEL P., RIVAS-MARINEZ S.** (1980) - A propos de la valeur bioclimatique de quelques essences forestières au Maroc. *Ecologia mediterranea*, n°5: 211-249.
- AHMED M., SHAUKAT S.S, BUZDAR A.H.** (1990) - Population structure and dynamics of *Juniperus excelsa* in Balouchistan, Pakistan. *Journal of Vegetation Science* 1: 271-276.
- ALIFRIQUI M.** (1993) - La dégradation du couvert végétal dans le Haut Atlas de Marrakech: Causes et conséquences. In *Montagnes et Hauts-Pays de l'Afrique* (2), *Utilisation et Conservation des Ressources*. Ed. Bencherifa A., 319-329.
- ALIFRIQUI M., M'HIRIT O., MICHALET R., PELTIER J.P.** (1995) - Variabilité des précipitations dans le Haut Atlas occidental marocain. *Le Climat*, vol. 13, n°1: 11-28.
- ARCHIBOLD O. W.** (1995) - Mediterranean ecosystems. In, *Ecology of world vegetation*, Ed. Chapman & Hall, 510p, 1995: 131-164.
- ARCHILOQUE A., BOREL A.** (1965) - Une série résiduelle du Genévrier thurifère dans les Alpes du Sud. *Documents pour la carte de la végétation des Alpes III*. Laboratoire de Biologie Végétale de Grenoble et du Lautaret, Université de Grenoble, 119-132.
- ART H. W., MARKS P., L.** (1971) - A summary table of biomass and net annual primary production in forest ecosystems of the world. In *Forest Biomass Studies*, H. E. Young, ed., pp. 1-34. (Int. Union of forest Res. Organizations Conf., Sect. 25, Gainesville, Floride) Orono, Maine: Univ. Of Maine, Life Science and Agriculture Experiment Station.
- AUBERT G.** (1970) - Méthode d'analyse des sols. *Marseille: CRDP*, 171p.
- AUCLAIR L.** (1991) - Bois de feu et sociétés rurales, Haut-Atlas et région présaharienne (Maroc) - Comportements énergétiques et modes de gestion des ressources naturelles. *Thèse, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier*: 334p + annexes.
- AUCLAIR L.** (1993) - Le Genévrier thurifère (*Juniperus thurifera* L.), géant de l'Atlas. *Forêt méditerranéenne*, t. XIV (4): 306-314.
- BADRI W.** (1994) - Le genévrier thurifère (*Juniperus thurifera* L.) une espèce fortement menacée des Atlas marocains: Evaluation de la phytomasse aérienne d'un peuplement du Haut Atlas de Marrakech. Essais de germination , *Rapport scientifique de fin de stage, Université Cadi Ayyad Marrakech, AUPELF-UREF, Université Paul Sabatier Toulouse*: 43p.

- BADRI W., ZAOUI E., HAFIDI M., GAUQUELIN T.** (1994) - Biomasse et minéralomasse aérienne d'un peuplement à Genévrier thurifère du Haut Atlas de Marrakech , *Bull. Fac. Sc. Marrakech (sect. Sci. Vie)*, sous presse: 7p.
- BAIZE D.** (1988) - Guide des analyses courantes en pédologie. *INRA, Paris*, 172p.
- BARBERO M., BONIN G., LOISEL R., QUÉZEL P.** (1990a) - Changes and disturbances of forest ecosystems caused by human activities in the western part of the mediterranean basin. *Vegetatio*, 87: 151-173.
- BARBERO M., HAMMOUD A., QUÉZEL P.** (1987) - Le Genévrier thurifère dans les Alpes Ligures. *Bull. Soc. Linn. Provence*, 39: 75-79.
- BARBERO M., HAMMOUD A., QUÉZEL P.** (1988) - Sur la découverte dans les Alpes Maritimes italiennes du Genévrier thurifère (*Juniperus thurifera* L.). *Webbia*, 42 (1): 49-55
- BARBERO M., LEBRETON P., QUÉZEL P.** (1994) - Sur les affinités biosystématiques et phytoécologiques de *Juniperus thurifera* L., et de *Juniperus excelsa* Bieb. *Ecologia Mediterranea*, XX (3/4): 21-37.
- BARBERO M., QUÉZEL P., LOISEL R.** (1990b) - Les apports de la phytoécologie dans l'interprétation des changements et perturbations induits par l'Homme sur les écosystèmes forestiers méditerranéen. *Forêt méditerranéenne*, XII (3): 194-215.
- BARROUCH L., KELLER R.** (1994) - Estimation à partir de prélèvements non destructifs de la production potentielle de bois de qualité de Cèdre de l'Atlas sur quatre types de substrats au Maroc. *Ann. Rech. For. Maroc*, 27 (spécial), vol. 1, 674-681.
- BARTH R. C.** (1980) - Influence of pinyon pine trees on soil chemical and physical properties. *Soil Science Society of America Journal*, 44: 112-114.
- BASKERVILLE G. L.** (1972) - Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass. *Canadian Journal of Forest Research*, 2: 49-53.
- BAUDIERE A., SERVE L.** (1971) - Recherches sur les teneurs en carbone organique des sols de haute montagne dans le bassin méditerranéen occidental. *Coll. Interdisc. Mil. Nat. Supraf. Mont. Bass. Occid. Médit.*: 147-169.
- BELLAKHADAR J.** (1997) - La pharmacopée marocaine traditionnelle , *Ibis Press*: 764p.
- BENABID A.** (1982) - Bref aperçu sur la zonation altitudinale de la végétation climacique du Maroc. *Ecologia Mediterranea*, T. VIII, Fasc.1/2, 301-315.
- BENZYANE M., KHATOURI M.** (1992) - Accroissement et productivité des taillis d'Arganier dans le plateau de Haha (Essaouira-Maroc). *Ann. Rech. For. Maroc*, 26: 14-21.
- BERTAUDIÈRE V.** (1999) - Dendroécologie du Genévrier thurifère dans la haute montagne méditerranéenne (Haut Atlas, Maroc), et dans une station xérothermique des Pyrénées Centrales (France). *Thèse Université Paul Sabatier, Toulouse*, 235p.

- BERTAUDIÈRE V., MONTES N.** Cartographie, dynamique et aperçu floristique du versant sud de la station à *Juniperus thurifera* de la montagne de Rié (Haute-garonne, France) , *Mémoire de maîtrise, Université Paul Sabatier, Toulouse*: 55p.
- BERTAUDIÈRE V., MONTES N., GAUQUELIN T.** (1999) - approche dendrochronologique du genévrier thurifère: exemple de la montagne de Rié (Pyrénées, France) - dynamique du peuplement et sensibilité de l'arbre au climat - *Actes du colloque "Genévrier thurifère", 26 et 27 septembre 1997, Marignac (Haute-Garonne). Les Dossiers Forestiers, publications de l'ONF (sous presse).*
- BERTRAND C., BERTRAND G.** (1999) - les junipéraies à genévrier thurifère dans les géosystèmes cantabriques : analyse d'une "durabilité". *Actes du colloque "Genévrier thurifère", 26 et 27 septembre 1997, Marignac (Haute-Garonne). Les Dossiers Forestiers, publications de l'ONF (sous presse).*
- BIGOT L., BOUMEZZOUGH A., EL ALAOU EL FELS A.** (1989) - Contribution à l'étude des insectes liés au genévrier thurifère (*Juniperus thurifera* L.) dans le Haut-Atlas marocain: biologie de deux microlépidoptères ravageurs dominants des galbules et des graines: *Argyrestia reticulata* (Yponomeutidae) et *Pammene juniperana* (Tortricidae), espèces nouvelles pour le Maroc. *Bull. Soc. ent. Fr.*, 93 (7-8): 233-238.
- BISCH J.L.** (1986) - Le taux de conversion de volumes de bois frais en biomasse: amélioration de ses méthodes d'estimation. *Annales des Sciences forestières*, 43 (3): 383-396.
- BLANCO CASTRO E., CASADO GONZALEZ M. A., COSTA TENORIO M., ESCRIBANO BOMBIN R., GARCIA ANTON M., GENOVA FUSTER M., GOMEZ MANZANAQUE A., GOMEZ MANZANAQUE F., MORENO SAIZ J. C., MORLA JUARISTI C., REGATO PAJARES P., SAINZ OLLERO H.** (1997) - Sabinars y enebrales. In, *Los bosques ibericos, una interpretacion geobotanica - Ed. Planeta, 1997*: 309-343.
- BONTZOLAKIS-BOUHIA N.** (1993) - Le peuplement à Genévrier thurifère de la montagne de Rié (Haute-Garonne). Approche édaphologique et fonctionnelle. *D.E.A Géographie et aménagement, Université Toulouse le Mirail / UPS*: 64p.
- BOOSE E. R., BOOSE E. F., LEZBERG A. L.** (1998) - A practical method for mapping trees using distance measurements. *Ecology*, 79 (3): 819-827.
- BOREL A., POLIDORI J.L** (1983) - Le genévrier thurifère (*Juniperus thurifera* L.) dans le Parc National du Mercantour (Alpes Maritimes). *Bull. Soc. Bot. Fr.*, 130: 227-242.
- BOTTNER P.** (1982) - Evolution des sols et conditions bioclimatiques méditerranéennes. *Ecologia mediterranea VIII, fasc. 1/2*: 115-134.

- BOUDY P.** (1958) - Genévrier thurifère, *Juniperus thurifera* L. Var. Marocana (Maire). *Economie forestière Nord Africaine, II: Monographie et traitements des essences forsières, Univ. Paris V*, 878p: 754-758.
- BOUDY P., EMBERGER L.** (1934) - III - La forêt marocaine. *La science au Maroc, Imprimeries réunies Casablanca*: 191-206.
- BOULLARD B.** (1986) - Les mycorrhizes des *Juniperus* de la flore française. *Bulletin de la Société mycologique de France*, 102 (1): 1-18.
- BOURBOUZE A.** (1997) - Des agdals et des mouflons - Protection des ressources et (ou) développement rural dans le parc naturel du Haut Atlas Oriental (Maroc) - *Courrier de l'Environnement de l'INRA*, n°30: 63-72.
- BOURBOUZE A., HAMMOUDI A.** (1976) - L'unité montagnarde expérimentale de développement intégré de la vallée de l'Azzaden (Haut Atlas central) III - Le système de productions animales. *Rapport d'étude Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II / Direction des Eaux et Forêts*: 87p.
- BRAUN-BLANQUET J.** (1922) - Une recherche phytosociologique dans le Briançonnais. *Bull. Soc. Bot. Fr., Comptes-rendus Session extraordinaire*, 69: 77-81.
- BRAUN-BLANQUET J., DE BOLOS O.** (1957) - Les groupements végétaux du Bassin moyen de l'Ebre et leur dynamisme. *Anale de la Estacion experimental de Aula Dei*, vol. 5, n° 1-4: 213-248.
- BREISTROFFER M.** (1937) - La flore de la vallée inférieure du Buëch (Hautes Alpes). *P. V. de la Société Dauphinoise d'études biologiques*, 294: 91-102.
- BREISTROFFER M.** (1940) - Contribution à l'étude des plantes vasculaires du Dauphiné. *Bull. Soc. Bot. Fr.*, 87: 47-59.
- BREISTROFFER M.** (1946) - Contribution à l'étude des plantes vasculaires du Dauphiné. *Bull. Soc. Bot. Fr.*, 93: 327-355.
- BRESHEARS D. D., MYERS O. B., JOHNSON S. R., MEYER C. W., MARTENS S. N.** (1997a) - Differential use of spatially heterogeneous soil moisture by two semiarid woody species: *Pinus edulis* and *Juniperus monosperma*. *J. of Ecol.* 85: 289-299.
- BRESHEARS D. D., RICH P. M., BARNES F. J., CAMPBELL K.** (1997b) - Overstory-imposed heterogeneity in solar radiation and soil moisture in a semiarid woodland. *Ecol Appl.*, 7 (1): 1201-1215.
- BRUNSTEIN C.F, YAMAGUCHI D.K** (1992) - The Oldest Known Rocky Mountain Bristelcone Pines (*Pinus aristata* Engelm.). *Artic and Alpine Research*, Vo. 24, N° 3: 253-256.
- BRYANT F., KOTHMANN M.** (1979) - Variability in predicting edible browse from crown volume. *Journal of Range Management*, 32 (2): 144-146.

- BURKHARDT J. W., TISDALE E. W.** (1976) - Causes of juniper invasion in southwestern Idaho. *Ecology*, 76: 472-484.
- BUTTOUD G.** (1994) - L'après-bois de feu en zone aride: le cas du Maroc présaharien. *Sécheresse*, 1 (5): 7-12.
- CABIDOCHÉ Y. M.** (1979) - Contribution à l'étude des sols de haute montagne. Analyse des relations sol-milieu dans les Pyrénées occidentales cristallines et calcaires. *Thèse de 3^{ème} cycle, 2 volumes*, 157p + 61p.
- CANNELL M.G.R** (1982) - World Forest Biomass and Primary production Data , *Academic Press*: 67: 198-294.
- CARTER M. R.** (1993) - Soil sampling and methods of analysis. *Canadian Society of Soil Science, Lewis Publishers*, 823p.
- CHAMBERS J. C., VANDER WALL S. B., SCHUPP E.** (1999) - Seed and seedling ecology of Piñon and Juniper species in the Pygmy woodlands of Western North America. *The Botanical Review*, vol. 65 (1): 1-38.
- CHARRAS A.** (1993) - Quelques réflexions sur le Genévrier thurifère des Baronnie: St André de Rosan (Hautes-Alpes), Laux-Montaux (Drôme), Chauvac (Drôme) ou sur quelques subtilités dans le découpage des départements en 1970. (Note non publiée).
- CHIRIO L., BLANC C. P.** (1997) - Analyse de la distribution des reptiles dans le massif de l'Aures (Algérie). *Écologie*, 28 (4): 281-292.
- CIESLA W. M., GHULAM M., HAFEEZ BUZDAR A.** (1998) - Balochistan's ancient junipers: Bringing sustainable management today zone forest. *Journal of Forestry*, April: 34-37.
- COLLARDET J., BESSET J.** (1988) - Bois résineux (Conifères) , Les bois commerciaux et leurs utilisation., *Ed.. H. Vial et Centre technique du bois et de l'ameublement - Tome I*: 218-222.
- CONRAD M.** (1975) - Contribution à l'étude de la flore de la Corse. *Le Monde des Plantes*, 383: 4.
- CONRAD M.** (1986) - Essai sur la répartition de *Juniperus thurifera* L. en Corse, en 1985. *Le Monde des Plantes*, n° 423-424: 1-2.
- COSTA TENORIO M., FERNANDO MANZANAQUE G., MORLA JUARISTI., SAINZ OLLERO H.** (1996) - Del tratamiento geobotánico y fitosociológico de los sabinas albares españoles. *Anales Jard.Bot. Madrid*, 54: 490-503.
- COSTA TENORIO M., MORLA JUARISTI., SAINZ OLLERO H.** (1987) - Contribucion a la tipificacion de los sabinas albares (*Juniperus thurifera* L.) en el Sistema Iberico meridional. *Lazaroa*, 7: 307-317.
- COSTE H., SOULIER** (1913) - Florule du Val d'Aran. *Imp. Monnoyer, Le Mans*, 132p.

- CRÉPIN J., JOHNSON R.L.** (1993) - Soil Sampling for Environmental Assessment. *Soil Sampling and Methods of Analysis*, M.R. Carter, Ed., Canadian Society of Soil Science: 5-18.
- DAVENPORT D. W., BRESHEARS D. D., WILCOX B. P., ALLEN C. D.** (1998) - Viewpoint: Sustainability of pinon-juniper ecosystems a unifying perspective of soil erosion thresholds. *Journal of Range Management*, 51: 231-240.
- DAVENPORT D. W., WILCOX B. P., BRESHEARS D. D.** (1996) - Soil Morphology of Canopy and Intercanopy Sites in a Pinon-Juniper Woodland. *Soil Science Society of America Journal*, 60: 1881-1887.
- DAVIDSON E. A., LEFEBVRE P. A.** (1993) - Estimating regional carbon stocks and spatially covarying edaphic factors using soil maps at three scales. *Biogeochemistry*, 22: 107-131.
- DE LITARDIERE R.** (1956) - Sur la présence en Corse de *Juniperus thurifera* L. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences*, 242: 2198-2201.
- DOBREMEZ J.F** (1979) - Note sur la teneur en matières organiques des sols himalayens le long d'une séquence topographique et climatique de grande amplitude. *Sciences Naturelles, Tome 4, Sols de montagne*: 49-53.
- DONADIEU P., BOURBOUZE A., DESTREMAU D. X.** (1976) - L'unité montagnarde expérimentale de développement intégré de la vallée de l'Azzaden (Haut Atlas central) I- Le milieu naturel et les pâturages. *Rapport d'étude Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II / Direction des Eaux et Forêts*: 77p.
- DRALLE K., RUDEMO M.** (1997) - Automatic estimation of individual tree positions from aerial photos. *Canadian Journal of Forest Research*, 27: 1728-1736.
- DUPIAS G.** (1960) - La Montagne de Rié. *Le Monde des Plantes*, n°329: 3-5.
- DUPLAT P., PERROTTE G.** (1981) - Inventaire et estimation de l'accroissement des peuplements forestiers. *O.N.F Section Technique*: 432p.
- DURRIEU G.** (1967) - Flore et végétation des Monegros (Espagne, Aragon). *Botanica Rhedonica, série A*, n°3: 229-240.
- DUVIGNEAUD P.** (1974) - La synthèse écologique. *Doin éd.*, 296p.
- EGUNJOBI J.K.** (1976) - An evaluation of five methods for estimating biomass of an even-aged plantation of *Pinus caribaea* L. *Oecologia plantarum*, 11 (2): 109-116.
- EL ALAOUI EL FELS M. A.** (1991) - Contribution à l'étude des communautés animales frondicoles de la Junipéraie à *Juniperus thurifera* L.: Impact des ravageurs sur le peuplement du genévrier thurifère dans le Haut Atlas de Marrakech (Maroc). *Thèse de 3^{ème} cycle, Uni. cadi Ayyad, Fac. Sci. Marrakech*, 129 p.

- EL YOUSFI S.M, BENCHEKROUN F.** (1992) - La dégradation forestière dans le sud marocain. Exemple de l'arganeraie d'Admine (Souss) entre 1969 et 1986. *Annales de la Recherche Forestière au Maroc - Tome 26*: 43-49.
- EMBERGER L.** (1934) - La végétation du massif des Sesksawas (Grand Atlas Occidental). *C. R. Ac. Sc.*, 198: 968.
- EMBERGER L.** (1938) - La restauration de la zone forestière supérieure des montagnes marocaines, *Extrait du Bulletin de la Société des Sciences naturelles du Maroc, XVIII*: 213-217.
- EMBERGER L.** (1939) - Aperçu général sur la végétation du Maroc. Commentaire de la carte phytogéographique du Maroc au 1/500 000ème. *Veroff. geedbot. Inst. Rübel in Zürich, 14*: 43-157.
- ESCAREL G.** (1952) - Notes sur des herborisations en Corse et confirmation sur l'existence de quelques espèces rares. *Bulletin de la Société Botanique de France, 99*: 144-145.
- ESPER J., BOSSHARD A., SCHWEINGRUBER F.H., WINIGER M.** (1995) - Tree-rings from the upper timberline in the Karakorum. *Dendrochronologia, 13*: 79-88.
- FALINSKI J.B.** (1980) - Vegetation dynamics and sex structure of the populations of pioneer dioecious woody plants. *Vegetatio, 43*: 23-38.
- FERGUSON C.W.** (1968) - Bristelcone Pine: Science and Esthetics. *Science*: 839-846.
- FISHER M., GARDNER A. S.** (1995) - The status and ecology of a *Juniperus excelsa* subsp. *polycarpus* woodland in the northern mountains of Oman, *Vegetatio 119*: 31-51.
- FOURNIER P.** (1948) - Le livre des plantes médicinales et vénéneuses de France. *Encyclopédie Biologique, T. XXXI. Editions Lechevallier, Paris, II*, 229-240.
- FRANC N.** (1994) - Etude dendrométrique de la station à Genévrier thurifère de la montagne de Rié (Haute-garonne). *Mémoire de maîtrise, Université Paul Sabatier*: 27p.
- FRITTS H.C.** (1976) - Tree Rings and Climate. *Academic Press*: 567p.
- FROMARD F.** (1978) - Recherches sur la dynamique de la végétation des milieux supraforestiers pyrénéens: la vallée de Soulcem (Haute-Ariège). *Th. Doct. 3^{ème} cycle, Univ. P. Sabatier, Toulouse*, 159p.
- FROMARD F., GAUQUELIN T.** (1993) - Les formations à Genévrier thurifère au Maroc: un milieu et une espèce en régression. *Unasylva, Revue Internationale des forêts et des industries forestières, FAO, 172, 44 (1)*: 52-58.
- GAMISANS J.** (1971) - Contribution à l'étude de la flore de la Corse. II. *Candollea, 26*: 309-358.

- GAMISANS J., GRUBER M.** (1979) - La végétation du Niolu (Corse). *Ecologia Mediterranea*, 4: 141-156.
- GARDNER A.S, FISHER M.** (1994) - How the forest lost its trees: Just So storytelling about *Juniperus excelsa* in Arabia. *Journal of Arid Environment*, 26: 299-301.
- GAUQUELIN T.** (1985) - Végétation et formations superficielles dans les milieux supraforestiers du Haut Atlas de Marrakech: étude d'un transect (Massif de l'Oukaïmeden). *Colloques phytosociologiques XIII, Végétation et Géomorphologie*, Bailleul: 307-323.
- GAUQUELIN T.** (1988) - Dynamique de la végétation et des formations superficielles dans les montagnes du bassin occidental de la Méditerranée. *Thèse de Doctorat d'Etat* (2 tomes) - Université P. Sabatier, Toulouse: 145p + annexes.
- GAUQUELIN T., BAUDIERE A.** (1981) - Le carbone organique des formations superficielles des nappes de débris supraforestiers, révélateurs de l'évolution locale des versants. *106^{ème} Congrès national des sociétés savantes, Perpignan, section géographie* : 87-100.
- GAUQUELIN T., BERTAUDIÈRE V., MONTES N., BADRI W., ASMODÉ J.F.** (1999) - Endangered stands of Thuriferous juniper in the western mediterranean basin: Ecological status, Conservation and Management. *Biodiversity and Conservation*, 8 (11):1479-1498, 1999.
- GAUQUELIN T., BERTAUDIÈRE V., MONTES N., SAVOIE J.M., BADRI W.** (1998a) - Hétérogénéité fonctionnelle des groupements forestiers présteppiques à genévrier thurifère des Atlas marocains. *Actes du Colloque "Végétation et Sols de montagne - Diversité, Fonctionnement et Evolution"*, Grenoble: 8p.
- GAUQUELIN T., DAGNAC J.** (1988) - Caractéristiques édaphiques des groupements à Genévrier thurifère des Atlas marocains: étude des niveaux superficiels des sols sous couvert et hors couvert: *Ecologia mediterranea*, XIV (3/4): 43-56.
- GAUQUELIN T., FROMARD F., BADRI W., DAGNAC J.** (1992) - Apports d'éléments minéraux au sol par l'intermédiaire de la litière, des pluies et des pluviolessivats dans un peuplement à genévrier thurifère (*Juniperus thurifera* L) du Haut Atlas occidental (Maroc). *Annales des Sciences forestières*, 49: 391-414.
- GAUQUELIN T., IDRISSE HASSANI M., LEBRETON P.** (1988) - Le genévrier thurifère, *Juniperus thurifera* L. (cupressacées): analyse biométrique et biochimique, propositions systématiques. *Ecologia mediterranea*, XIV (3/4): 31-42.
- GAUQUELIN T., JALUT G., IGLESIAS M., VALLE F.** (1998b) - Phytomass and carbon storage in the steppes of eastern Andalusia, Spain. *Ambio*, 27, (2): 99-103.
- GAUQUELIN T., JALUT G., VALLE F., FROMARD F., DEDOUBAT J.J.** (1996) - Phytomass and carbon storage in the *Stipa tenacissima* steppes of the Baza basin, Andalusia, Spain. *Journal of Arid Environments*, 34: 277-286.

- GAUQUELIN T., LEBRETON PH.** (1998) - Systématique de *Juniperus thurifera* L.: le cas de la population pyrénéenne de la Montagne de Rié (Haute-Garonne, France). *J. Bot. Soc. bot. Fr.* 5: 105-109.
- GAUQUELIN T., SAVOIE J. M.** (1990) - Evolution de l'humidité du sol en relation avec le couvert arboré dans un écosystème à *juniperus thurifera* L. du Haut-Atlas de Marrakech (Maroc). *Actes du colloque Ecologie et Biogéographie Alpines, La Thuile, 2-6 septembre 1990*: 209-218.
- GAUSSEN H.** (1968) - Les gymnospermes actuelles et fossiles. Fasc. X: les Cupressacées. *Faculté des Sciences de Toulouse*, 326p.
- GRANT M. C., MITTON J. B.** (1979) - Elevational gradients in adult sex ratios and sexual differentiation in vegetative growth rates of *Populus tremuloides* Michx. *Evolution*, 33: 914-918.
- GUERBY L.** (1993) - Une nouvelle station de genévrier thurifère (*Juniperus thurifera* L.) dans les Pyrénées: le Quié de Lujat (Ussat les Bains, Ariège). *Le Monde des Plantes*, 447: 26-27.
- GUINIER P.** (1929) - Note biologique sur un Genévrier des Alpes Françaises. *Comptes-rendus des séances de la Société de Biologie de Nancy, séance du 12 avril, tome C*: 1142-1144.
- HAJAR A. S., FARAGALLA A. A., AL-GHAMDI K. M.** (1991) - Impact of biological stress on *Juniperus excelsa* M. Bieb. In south-western Saudi Arabia: insect stress. *Journal of Arid Environments*, 21: 327-330.
- HALOUI B.** (1986) - Contribution à l'étude du milieu et de la végétation du bassin versant de l'oued Rheghaya (Haut Atlas de Marrakech). *Thèse 3^o cycle, Université Cadi Ayyad, Marrakech*: 123p.
- HALOUI B.** (1992) - Phytomasse, minéralomasse et productivité des principaux écosystèmes forestiers du Maroc oriental. *Actes des Premières Journées de l'Arbre, Fac. Sci. Semlalia*,: 91-93.
- HAMMOUDI A.** (1977) - La Vallée de l'Azzaden: Contribution à la sociologie du Haut Atlas marocain. *Thèse de 3^o cycle, Ecole des Hautes Etudes en Science Sociale, Paris*: 340p.
- HENSENS J.** (1975) - Azzaden, pré-étude sur l'habitat rural dans le Haut Atlas occidental, Commune de Ouirgane, Province de Marrakech. *Ministère de l'Urbanisme, de l'Habitat, du Tourisme et de l'Environnement, Rabat*, 80p.
- HERRERA C. M.** (1988) - Plant size, spacing patterns, and host-plant selection in *Osyris quadripartita*, a hemiparasitic dioecious shrub. *Journal of Ecology*, 76: 995-1006.
- HUGES G., VARNER L., BLANKENSHIP L.** (1987) - Estimating shrub production from plant dimensions. *Journal of Range Management*, 40 (4), 367-369.

- JAHANDIEZ E.** (1933) - Vieux arbres remarquables du Maroc. *La Terre et la Vie*, 3: 7p.
- JOFFRE R., LACAZE B.** (1993) - Évaluation de la densité des arbres en zone semi-aride à partir de données SPOT panchromatiques. *Outils microinformatiques et télédétection de l'évolution des milieux, Troisièmes journées du réseau de télédétection de l'UREF, Toulouse, 13-16 novembre 1990*: 355-364.
- JOHNSEN T. N.** (1962) - One seed juniper invasion of northern Arizona grasslands. *Ecol. Monogr.*, 32: 187-207.
- JORDANO P.** (1993) - Geographical ecology and variation of plant-seed disperser interactions: southern spanish junipers and frugivorous thrushes. *Vegetatio* 107/108: 85-104.
- KAUFFMAN J. MARTIN R.** (1990) - Sprouting shrub response to different seasons and fuel consumption levels of prescribed fire in Sierra Nevada mixed conifer ecosystems. *Forest Science*, 36 (3): 748-764.
- LATHUILLIERE L.** (1994a) - Le Genévrier thurifère (*Juniperus thurifera* L.). Monographie. Etude de la Thuriféraie de St-Crépin. Le Genévrier thurifère dans le Sud-Est de la France. *Mémoire de fin d'études, ENGREF*: 80p.
- LATHUILLIERE L.** (1994b) - Le Genévrier thurifère: Element remarquable de la flore des Alpes du Sud, *Haute-Provence Magazine*, N° 57: 6-7.
- LAURENT L.** (1933) - A propos de la découverte de nouvelles stations de *Juniperus thurifera* dans les Basses-Alpes. *Revue de la Société Horticole et Botanique des Bouches-du Rhône*, 779: 88-93.
- LAVAGNE A., ARCHILOQUE A., BOREL L., DEVAUX J-P., MOUTTE P., CADEL G.** (1983) - La végétation du parc naturel régional du Queyras; commentaires de la carte phytoécologique au 50.000^{ème}. *Rev. Biol. et Ecol. Médit. Tom. X, Fasc. 3* : 175 - 248.
- LE HOUEROU H. N.** (1986) - The desert and arid zones of Northern Africa. In: *Evenari, M. et al. (Eds), Hot Deserts and Arid Shrublands, vol. 12B, pp. 101-147. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B. V.* 451p.
- LEMOINE-SEBASTIAN C.** (1965) - Ecologie des Genévriers au Maroc. *Bull. Soc. Sci. Nat. et phys. du Maroc*, tome 45: 49-116.
- LENOBLE F.** (1924) - Découverte du *Juniperus thurifera* L. dans les montagnes du Diois (Drôme). *Bull. Soc. Bot. France*, 71: 49-51.
- LEONARDI S., RAPP M.** (1980) - Biomasse et composition minérale de *Quercus ilex* L. du Monte Minardo (Etna). *Extrait de Archivio e Biogeografico Italiano*, 56 (1/2): 69-84.
- LEONARDI S., RAPP M., FAILLA M., GUARNACCIA D.** (1996) - Biomasse, productivité et transferts de matière organique dans une séquence altitudinale de

- peuplements de *Castanea sativa* Mill de l'Etna. *Annales des Sciences. Forestières*, 53: 1031-1048.
- LEPOUTRE B.** (1961) - Recherches sur les conditions édaphiques de régénération des cédraies marocaines. *Annales de la Recherche Forestière au Maroc*, 6 (2), rabat.
- LESTRA L.** (1921) - Contribution à l'étude du *Juniperus thurifera* var. *gallica*. Thèse doctorale, Université de Pharmacie de Lyon, Ed. Guitard, Toulouse, 84p.
- LIETH H.** (1975) - Primary Production of the Major Vegetation Units of the World. In *Primary Productivity of the Biosphere, Ecological studies Vol.14*, Eds. Springer-Verlag, New York: 203-215.
- LILLELUND H, STAATSEN P.** (1986) - Projet Azilal, Hypothèse 0 (annexe 21), FAO/PNUD/MARA, MOR/81/004, Aménagement et Développement des zones de montagne du Haut Atlas central, Rabat.
- LLOYD D. G., WEBB C. J.** (1977) - Secondary sex characters in plants. *Botanical Review*, 43, 177-216.
- LUCAS SANTOLAYA J.A** (1998) - Gestion, aprovechamiento y desarrollo sostenible de las masas de enebro, jabino o sabina albar (*Juniperus thurifera* L.) en Soria , *Montes*, n°52: 121-130.
- LYON J.** (1968) - Estimating twig production of serviceberry from crown volumes. *J. Wild Manage*, 32 (1), 115-118.
- MARCEAU D. J., GRATRON D. J.** (1993) - Étude du contenu spectral et spatial d'images numériques et de l'impact sur la classification automatisée d'un couvert forestier. *Outils microinformatiques et télédétection de l'évolution des milieux, Troisièmes journées du réseau de télédétection de l'UREF, Toulouse, 13-16 novembre 1990*: 365-384.
- MARCIAU R.** (1992) - Pré-catalogue des espèces végétales rares du département de l'Isère. *Muséum d'Histoire Naturelle de Grenoble, Conseil Général de l'Isère*, p.14.
- MARTIN A. J.** (1984) - Testing volume equation accuracy with water displacement techniques. *Forest Science*, 30 (1): 41-50.
- MCDANIEL P. A., GRAHAM R. C.** (1992) - Organic Carbon Distributions in Shallow Soils of Pinyon-Juniper Woodlands. *Soil Science Society of America Journal*, 56: 499-504.
- MEYER D.** (1981) - La végétation des vallées de Valouise, du Fournel et de la Biaysse (Pelvoux Oriental, Hautes-Alpes); Analyse phytosociologique et phytogéographique des étages collinéens, montagnards et subalpins. *Thèse de 3^{ème} Cycle, Université de Provence Aix-Marseille I*, 176p.
- M'HIRIT O.** (1982) - Etude écologique et forestière des cédraies du Rif marocain. *Annales de la Recherche Forestière au Maroc, Tome 22*: 501p.

- M'HIRIT O., POSTAIRE J.G.** (1983) - Analyse de la forme des tiges du cèdre du Maroc. Application à la détermination des courbes de profil. *Annales des Sciences Forestières*, 40 (4): 355-372.
- MIGLIORETTI F.** (1987) - Contribution à l'étude de la production des taillis de chêne vert en forêt de la Gardiole de Rians (Var). *Annales des Sciences forestières*, 44 (2): 227-242.
- MONTES N., GAUQUELIN T., BADRI W., BERTAUDIERE V., ZAOUI E.H.** (1999) - A non-destructive method for estimating above-ground biomass in woodlands. *Forest Ecology and Management (sous presse)*.
- MORARD P., GULLO J. H.** (1970) - Minéralisation de tissus végétaux en vue du dosage de P, K, Ca, Mg, et Na. *Ann. Agro.*, 21 (2): 229-236.
- MUSTIN M.** (1987) - Le compost, gestion de la matière organique. *Ed. François Dubusc, Paris*, 954p.
- MYRE R., CAMIRE C.** (1994) - Distribution de P, K, Ca, Mg, Mn et Zn dans la tige des mélèze européen et laricin. *Annales des Sciences Forestières*, 51: 121-134.
- NIHLGARD B.** (1972) - Plant biomass, primary production and distribution of chemical elements. *Oikos* 23: 69-81.
- NYS C., BELKACEM S., CIESIELSKI JC.** (1994) - Rôle des caractéristiques de station et de l'espèce forestière dominante. *Les Dossiers de l'Environnement de l'INRA*, N°8: 201-213.
- OFFNER J., BREISTOFFER M.** (1948) - Sur la répartition géographique du *Juniperus thurifera* L. *Bull. Soc. Sci. Dauphiné*, 63: 6-8.
- OFFNER J.** (1922) - A propos d'un genévrier intéressant. Aire géographique du *Juniperus thurifera* L. et du *J. Thurifera* L. var. *Gallica* De Coincy. *La Parfumerie Moderne*, n° septembre: 3p.
- OLSON J. S., WATTS J. A., ALLISON L. J.** (1983) - Carbon in live vegetation of major world ecosystems. *Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee*: 180p.
- OUHAMMOU A.** (1992) - La thuriféraie du bassin de l'Azzaden, un écosystème forestier montagnard: , *Actes des Premières Journées de l'Arbre, Fac. Sci. Semlalia*,: 159.
- OUHAMMOU A., MULLER S., M'HIRIT O.** (1996) - Impact des activités pastorales sur la biodiversité floristique dans une thuriféraie limitrophe du Parc national de Toubkal, Haut-Atlas de Marrakech, Maroc. *Acta bot. Gallica*, 143 (4/5): 393-401.
- OUHMIDOU R.** (1993) - La végétation du Haut Atlas Occidental marocain. Synthèse cartographique, délimitation des formations à Genévrier thurifère. *Mémoire de DEA, Université P. Sabatier, Université Toulouse le Mirail*: 53p.
- OUHMIDOU R., ALIFRIQUI M., HALOUI B., OUHAMMOU A., PEYRE C., FROMARD F., GAUQUELIN T.** (1994) - Synthèse cartographique de la

végétation dans le Haut-Atlas occidental (Maroc). *Arbre et Développement, Actes des deuxièmes journées de l'arbre*: 21-26.

OZENDA P. (1966) - Perspectives nouvelles pour l'étude phytogéographique des Alpes du Sud. In *Documents pour la Carte de la Végétation des Alpes IV*, Université de Grenoble, 25-26 et 97-101.

PARDE J., BOUCHON J. (1988) - Dendrométrie. *ENGREF*, 2^e édition, Nancy: 328p.

PAYETTE S. (1974) - Classification écologique des formes de croissance de *Picea glauca* (Moench.) Voss et de *Picea mariana* (Mill) BSP. en milieux subarctiques et subalpins. *Nat. Can. (Qué.)*, 101: 893-903.

PEYRE C. (1979) - Recherche sur l'étagement de la végétation dans le massif du Bou-Iblane (Moyen Atlas Oriental, Maroc). *Thèse de 3^{ème} cycle, Univ. Econ. Sci. Aix Marseille III, St Jérôme*, 149p.

PEYRE C. (1983) - Etagement de la végétation et gradients climatiques dans le système Atlasique Marocain. Le bassin de l'Oued Rdat et le versant sud de l'Atlas au Méridien du Tizi N'Tichka. *Bull. Fac. Sci. Marrakech*, 2: 87-139.

PIEPER R. D. (1990) - Overstory-understory relations in pinyon-juniper woodlands in New Mexico. *Journal of Range Management*, 43: 413-415.

POBLADOR SOLER A. (1999) - La reproduction de *Juniperus thurifera* (Sabina albar) y su posterior adaptacion. *Actes du colloque "Genévrier thurifère", 26 et 27 septembre 1997, Marignac (Haute-Garonne). Les Dossiers Forestiers, publications de l'ONF (sous presse)*.

POLIDORI J. L. (1986) - Guide des conifères du Mercantour. *Centre Régional de Documentation pédagogique de Nice*: 48p.

PRADO J., INFANTE P., ARRIAGADA M. (1987) - Funciones de biomasa para seis especies arbustivas de la zona arida chilena. *Inst For, Santiago de Chile*.

PROGRAMME DES NATIONS UNIES POUR LE DEVELOPPEMENT - ROYAUME DU MAROC (1997) - Projections démographiques communales des provinces ciblées par le premier programme de priorités sociales (BAJ1) - Volume 2 , *Programme de développement humain durable et de lutte contre la pauvreté*: 53p.

PROUST F. (1973) - Étude stratigraphique, pétrographique et structurale du bloc oriental du massif ancien du Haut Atlas (Maroc). *Notes Serv. Géol. Maroc*, 34 (254): 15-53.

QUÉZEL P. (1957) - Peuplement végétal des hautes montagnes de l'Afrique du nord. Essai de synthèse biogéographique et phytosociologique. *Encyclopédie Biogéographique et Ecologique*, Ed. Paul Chevalier, Paris: 463p.

QUEZEL P. (1967) - A propos des xérophytes épineux en coussinet du pourtour méditerranéen. *Ann. Fac. Sc. Marseille XXXIX*, 173-181.

- QUÉZEL P., BARBERO M.** (1981) - Contribution à l'étude des formations pré-steppiques à genévriers au Maroc. *Bull. Soc. Broteriana* 2: 1137-1160.
- RAMEAU J. C., MANSION D., DUME G.** (1993) - Flore Forestière Française (Guide écologique illustré), Tome 2: Montagnes. Ed. *Institut pour le Développement Forestier, Paris et École Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, Nancy*, 2421p.
- RANGER J.** (1981) - Etude de la minéralomasse et du cycle biologique dans deux peuplements de Pin laricio de Corse, dont l'un a été fertilisé à la plantation. *Annales des Sciences forestières*, 38 (1): 127-158.
- RANGER J., CUIRIN G., BOUCHON J., COLIN M., GEHAYE D., MOHAMED, AHAMED D.** (1992) - Biomasse et minéralomasse d'une plantation d'épicéa commun (*Picea abies* Karst) de forte production dans les Vosges (France). *Annales des Sciences forestières*, 49: 651-668.
- REED D.D, LIECHTY H.O., BURTON A.J.** (1989) - A simple Procedure for Mapping Tree Locations in Forest Stands. *Forest Science*, 35 (3): 657-662.
- REVOL L.** (1937) - *Juniperus thurifera* L. dans le Vercors Septentrional. Bulletin de la Société Botanique Linnéenne de Lyon, 100-103.
- RITTENHOUSE L., SNEVA F.** (1977) - A technique for estimating big sagebush production. *Journal of Range Management*, 30 (1): 68-70.
- RIVAS-MARTINEZ S.** (1969) - Vegetatio Hispanicae. Notula I. El piso de vegetacion de los bosques sabineros de los paramos: *juniperetum hemisphaerico-thuriferae*. *P. Inst. Biol. Alp.*, 46, 5-34.
- ROQUES A., RAIMBAULT J.P., GOUSSARD F.** (1984) - La colonisation des cônes et galbules des genévriers méditerranéens par les insectes et acariens et son influence sur les possibilités de régénération naturelle des ces essences. *Ecologia mediterranea*, X (1-2): 147-169.
- RUIZ DEL CASTILLO J., FERNANDEZ-GALIANO E., GARCIA-VALDECANTOS J. L.** (1999) - Productores optimos de estaquilla de *Juniperus thurifera* para la reproduccion agamica. *Actes du colloque "Genévrier thurifère"*, 26 et 27 septembre 1997, Marignac (Haute-Garonne). *Les Dossiers Forestiers, publications de l'ONF (sous presse)*.
- SALOMONSON M. G., BALDA R. P.** (1977) - Winter territoriality of Townsend's solitaires (*Myadestes townsendi*) in a piñon-juniper-ponderosa pine ecotone. *Condor*, 79: 148-161.
- SCIFRES C., KOTHMANN M., MATHIS G.** (1974) - Range site and grazing systems influenced regrowth after spraying honey mesquite. *Journal of Range Management*, 27 (2): 97-100.

- SEBASTIAN C.** (1958) - Essai de germination de quatre espèces du genre *Juniperus*. *Bull. Soc. Sci. Nat. et Phys. du Maroc*, tome XXXVIII: 115-122.
- SWITZER G. L., NELSON L. E., SMITH W. H.** (1968) - The mineral cycling in forest stands. In: *Forest Fertilisation. Tenenge Manage*, 30(4): 311-314.
- TAUSCH R. J., TUELLER P. T.** (1990) - Foliage biomass and cover relationships between tree- and shrub-dominated communities in pinyon-juniper woodlands. *Great Basin Naturalist*, 50: 121-134.
- TAUSCH R. J. WEST N. E., NABI A. A.** (1981) - Tree age and dominance patterns in Great Basin woodlands. *Journal of Range Management*, 34: 259-264.
- TIESSEN H., MOIR J.O.** (1993) - Total and Organic Carbon. *Soil Sampling and Methods of Analysis*, M. R. Carter Ed.: 187-199.
- TONNESEN A.S, EBERSOLE J.J** (1997) - Human trampling effects on regeneration and age structures of *Pinus edulis* and *Juniperus monosperma*. *Great Basin Naturalist* 57 (1): 50-56.
- TRANQUILLINI W.** (1979) - Physiological Ecology of the Alpine Timberline. *Editions Springer-Verlag*: 137p.
- TSIOURLIS G.M.** (1992) - Etude d'un écosystème de maquis à *Juniperus phoenicea* L. (Naxos, Cyclades, Grèce): phytomasse et nécromasse épigées. *Bulletin Ecologique*, 23 (1-2): 59-69.
- URESK D., GILBERT R., RICKARD W.** (1977) - Sampling big sagebrush for phytomass. *Journal of Range Management*, 30 (4): 311-314.
- VAN CAMPO E., GUIOT J., CHANGHUI P., JALUT G., GAUQUELIN T., IGLESIAS M., CHEDADDI R.** (1994) - Variation du réservoir continental de carbone associé. *Séminaire Ecosystèmes & changements globaux*, Dourdan: 243-251.
- VAN HAVERBEKE D. F., READ R. A.** (1976) - Genetics of eastern redcedar. *United States Department of Agriculture, Forest Service Research Paper*, WO-32.
- VASILIAUSKAS S.A., AARSEN W.** (1992) - Sex ratio and neighbouring effects in monospecific stands of *Juniperus virginiana*. *Ecology*, 73 (2): 622-632.
- VELASCO F., ALBAREDA J. M.** (1966) - El humus en los suelos forestales espanoles IV. Estudio de la composicion mineral de diversas especies forestales del sistema iberico y su influencia sobre el complejo adsorbente del suelo y sobre el proceso de humificacion. *Anales de edafologia y agrobiologia*, XXV (5-6): 237-248.
- VELASCO F., DEL RIO J.** (1977) - Humification in the *Juniperus thurifera* L. forest of the Somosierra (Segovia) territory. *Anal. Edaf.*, Tome XXXVI, 9-10: 859-1086.
- VENET J.** (1987) - Identification et classement des bois français, *ENGREF*, 2° édition, Nancy: 307p.

- VETAAS O. R.** (1992) - Micro-site effects of trees and shrubs in dry savannas. *J. Veg. Sci.*, 3: 337-344.
- VILLAR L. & FERRANDEZ J. V.** (1999) - Usos etnobotanicos de la sabina albar y arbustos que le acompanan en Aragon. *Actes du colloque "Genévrier thurifère", 26 et 27 septembre 1997, Marignac (Haute-Garonne). Les Dossiers Forestiers, publications de l'ONF (sous presse).*
- WARD L.K.** (1982) - The conservation of Juniper: Longevity and old age. *Journal of Applied Ecology*, 19: 917-928.
- WHITTAKER R. H.** (1970) - Communities and Ecosystems. 162pp, New York: Macmillan.
- WIDMANN M.** (1950) - Le Genévrier thurifère dans les Hautes-Alpes. *Revue de Géographie Alpine, III*: 493-508.
- WILCOX B. P.** (1994) - Runoff and erosion in intercanopy zones of pinyon-juniper woodlands. *Journal of Range Management*, 47: 285-295.
- ZINKE P. J., STANGENBERGER A. G., POST W. M., EMANUEL W. R., OLSON J. S.** (1984) - Worldwide organic soil carbon and nitrogen data. *Environmental Science Divison*: 141p.

ANNEXES

Tableau des caractéristiques dendrométriques des arbres	194 et 195
Tableau de la phytomasse et de la productivité des arbres	197 et 196
Échantillonnage des xérophytes	198 et 199
Morphotypes des arbres échantillonnés	200 à 203

Caractéristiques dendrométriques des arbres

	Relevé/Arbre	Altitude (m)	Pente (D°)	Sexe	Forme	H mes. (m)	H calc. (m)	Ph (m ²)
Densité 1	A1-1/1	2330	30	F	H	5,10	6,11	62,3
	A1-1/2	2330	30	M	H	4,20	4,71	52,8
	A1-1/3	2330	30	M	H	3,60	4,40	24,5
	A1-2/1	2350	30	F	H	4,50	7,07	58,6
	A1-2/2	2350	30	F	H	3,10	3,99	27,3
	A1-2/3	2350	30	F	H	2,60	3,11	16,7
	A1-3/1	2280	30	M	H	3,20	4,73	56,7
	A1-3/2	2280	30	M	H	1,90	3,07	10,1
	A1-3/3	2280	30	F	H	4,20	4,34	32,1
	A1-3/4	2280	30	M	H	3,00	3,50	4,9
	A1-3/5	2280	30		H	0,40	0,31	0,2
	A1-3/6	2280	30		H	1,40	1,42	3,1
	A1-4/1	2275	30	M	H	4,80	5,03	33,0
	A1-4/2	2275	30		H	0,90	1,15	2,0
	A1-4/3	2275	30	M	H	3,40	3,65	11,3
	A1-4/4	2275	30		H	1,00	0,92	1,0
	A1-4/5	2275	30	F	H	5,30	5,60	41,8
	A1-4/6	2275	30	F	H	2,50	2,52	6,3
Densité 2	A2-1/1	2150	33	M	TM	5,80	5,64	45,0
	A2-1/2	2150	33	M	E	6,50	7,44	88,8
	A2-1/3	2150	33	M	I	4,20	5,06	34,3
	A2-1/4	2150	33	F	C	4,75	3,77	2,3
	A2-2/1	2085	29	F	TM	4,90	4,61	29,9
	A2-2/2	2085	29	M	E	3,60	3,47	35,7
	A2-2/3	2085	29	F	H	3,10	3,60	13,5
	A2-2/4	2085	29	F	A	6,60	6,46	41,9
	A2-2/5	2085	29	F	A	5,00	4,87	31,4
	A2-2/6	2085	29	M	H	1,50	1,62	3,6
	A2-2/7	2085	29	F	H	2,30	2,62	13,8
	A2-2/8	2085	29		H	0,25	0,35	0,1
	A2-2/9	2085	29		H	0,40	0,66	0,5
	A2-3/1	1925	33	F	I	4,80	4,54	13,4
	A2-3/2	1925	33		H	0,80	0,97	1,0
	A2-3/3	1925	33	F	H	2,20	2,27	5,9
	A2-3/4	1925	33	F	H	3,80	3,86	19,2
	A2-3/5	1925	33	F	A	3,80	3,81	7,5
	A2-3/6	1925	33	M	A	4,00	3,42	13,3
	A2-3/7	1925	33	M	E	3,40	4,07	22,3
	A2-3/8	1925	33		H	1,00	1,19	1,7
	A2-4/1	1980	30	M	E	3,60	3,73	21,3
	A2-4/2	1980	30	M	H	1,65	1,71	2,5
	A2-4/3	1980	30	M	TM	3,70	3,34	26,2
	A2-4/4	1980	30	F	A	3,80	3,86	15,1
	A2-4/5	1980	30	F	A	4,00	3,82	13,6
	A2-4/6	1980	30	M	H	3,60	3,51	11,8
	A2-4/7	1980	30	M	H	3,00	3,22	31,5
	A2-4/8	1980	30	M	H	3,20	3,67	11,0
Densité 3	A3-1/1	2135	20	F	A	4,90	4,32	23,4
	A3-1/2	2135	20	F	TM	4,60	4,61	18,4
	A3-1/3	2135	20		H	2,50	2,99	4,3
	A3-1/4	2135	20	F	E	2,50	2,20	17,3
	A3-1/5	2135	20		H	1,95	1,80	3,8
	A3-1/6	2135	20	F	E	3,40	4,11	33,8
	A3-1/7	2135	20	M	E	2,95	3,42	71,4
	A3-2/1	2155	10	M	I	2,60	2,66	21,3
	A3-2/2	2155	10	F	TM	3,60	4,03	21,2
	A3-2/3	2155	10	F	I	4,50	4,83	14,4
	A3-2/4	2155	10	F	I	3,80	3,62	13,2
	A3-2/5	2155	10	M	TM	6,00	5,91	25,6
	A3-2/6	2155	10	F	TM	5,50	4,70	36,8
	A3-2/7	2155	10	F	H	2,50	3,06	21,9

Densité 3	A3-2/8	2155	10	M	C	3,30	3,01	6,7
	A3-2/9	2155	10		I	3,45	4,24	30,1
	A3-3/1	1930	37	M	A	3,10	3,30	14,8
	A3-3/2	1930	37	F	H	3,60	3,22	13,7
	A3-3/3	1930	37	M	H	5,00	5,64	30,2
	A3-3/4	1930	37	F	C	4,50	4,67	11,9
	A3-3/5	1930	37	M	A	4,70	4,86	25,4
	A3-3/6	1930	37	F	E	2,90	3,52	33,0
	A3-3/7	1930	37	M	A	5,50	5,34	31,2
	A3-4/1	1950	35	F	H	5,30	5,77	37,2
	A3-4/2	1950	35	M	E	2,90	4,12	45,6
	A3-4/3	1950	35	M	I	2,70	3,76	17,2
	A3-4/4	1950	35	M	E	3,80	4,03	25,7
	A3-4/5	1950	35	F	H	5,00	5,43	32,7
	A3-4/6	1950	35	M	E	3,40	4,75	34,5
Densité 4	A4-1/1	2050	25	F	H	3,40	3,37	19,1
	A4-1/2	2050	25	M	H	3,60	4,69	33,2
	A4-1/3	2050	25	M	H	4,20	4,03	32,1
	A4-1/4	2050	25	F	H	3,60	3,25	18,5
	A4-1/5	2050	25	F	H	5,50	5,05	39,0
	A4-2/1	2270	20	M	H	4,20	4,41	28,2
	A4-2/2	2270	20	M	H	3,80	5,01	53,1
	A4-2/3	2270	20	F	H	5,40	6,15	67,1
	A4-2/4	2270	20	M	I	2,80	2,77	11,7
	A4-2/5	2270	20	M	A	3,20	3,20	12,6
	A4-2/6	2270	20	F	E	4,80	4,35	45,7
	A4-2/7	2270	20	F	H	6,00	5,63	87,1
	A4-3/1	1980	22	F	TM	4,70	4,55	26,1
	A4-3/2	1980	22	M	A	4,60	3,75	21,7
	A4-3/3	1980	22	M	TM	3,10	3,65	31,5
	A4-3/4	1980	22	M	E	5,20	4,96	58,3
	A4-3/5	1980	22	M	E	4,50	4,82	73,8
	A4-3/6	1980	22	F	E	5,30	4,74	38,8
	A4-4/1	1915	25	F	A	5,80	4,83	10,5
	A4-4/2	1915	25	M	TM	5,30	5,61	57,7
	A4-4/3	1915	25	M	TM	5,30	4,59	33,1
	A4-4/4	1915	25	M	E	3,10	3,40	19,8
	A4-4/5	1915	25		H	1,10	1,93	4,1
	A4-4/6	1915	25	F	A	5,10	4,45	16,9
	A4-4/7	1915	25	F	A	4,25	3,81	17,4
	A4-4/8	1915	25	F	TM	4,00	4,04	29,7

Hmes.: Hauteur mesurée au dendromètre

Hcalc.: Hauteur calculée sur les photo par la méthode informatique

Ph: Projection du houppier

H: Forme Houppier au sol

A: Forme Arborescente

E: Forme Etalée

TM: Forme Troncs multiples

C: Forme Cierge

I: Forme Indéterminée

Phytomasse et productivité des arbres

	Rameaux		Troncs / Branches		Feuilles		Galbules		Biomasse totale		P. lign. (Kg)		
Relevé/Arbre	Biom. (kg)	σ	Biom. (kg)	σ	Biom. (kg)	σ	Biom. (kg)	σ	Biom. (kg)	σ	Biom. (kg)	σ	
Densité 1	A1-1/1	43,4	11,4	2506,6	443,7	80,7	21,1	10,0	2,6	2640,7	444,3	141,9	20,4
	A1-1/2	25,2	6,6	1395,8	247,2	52,5	13,8	0,0	0,0	1473,5	247,6	79,4	11,5
	A1-1/3	16,2	4,2	700,2	124,1	33,7	8,9	0,0	0,0	750,0	124,5	41,1	6,1
	A1-2/1	44,0	11,5	1727,0	305,9	81,7	21,4	10,1	2,6	1862,8	306,8	103,0	15,6
	A1-2/2	14,0	3,7	602,0	106,7	26,0	6,9	3,2	0,8	645,3	107,0	35,4	5,3
	A1-2/3	8,0	2,1	381,3	67,6	14,9	3,9	1,8	0,5	406,1	67,8	22,1	3,3
	A1-3/1	28,6	7,5	1068,9	189,4	59,7	15,7	0,0	0,0	1157,2	190,2	64,3	9,9
	A1-3/2	6,4	1,7	137,4	24,6	13,4	3,6	0,0	0,0	157,2	24,9	9,3	1,7
	A1-3/3	18,9	5,0	837,6	148,4	35,1	9,2	4,3	1,1	895,9	148,8	49,1	7,3
	A1-3/4	5,6	1,5	83,3	15,0	11,7	3,1	0,0	0,0	100,6	15,4	6,3	1,3
	A1-3/5	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,2	0,1	0,0	0,0
	A1-3/6	3,2	0,9	9,1	1,8	6,8	1,8	0,0	0,0	19,1	2,7	1,7	0,7
	A1-4/1	24,2	6,4	1118,6	198,1	50,5	13,3	0,0	0,0	1193,3	198,7	65,1	9,6
	A1-4/2	3,2	0,9	0,0	0,0	6,7	1,8	0,0	0,0	9,9	2,0	1,2	0,7
	A1-4/3	8,1	2,1	247,8	44,1	16,9	4,5	0,0	0,0	272,9	44,3	15,5	2,5
	A1-4/4	1,5	0,4	0,0	0,0	3,1	0,9	0,0	0,0	4,6	1,0	0,6	0,3
A1-4/5	30,4	8,0	1580,1	279,7	56,5	14,8	7,0	1,8	1674,0	280,2	90,6	13,2	
A1-4/6	4,0	1,1	93,1	16,7	7,5	2,0	0,9	0,3	105,5	16,9	6,2	1,1	
Densité 2	A2-1/1	23,7	6,2	1998,1	205,6	49,4	13,0	0,0	0,0	2071,2	206,1	49,7	7,0
	A2-1/2	48,2	12,6	2669,7	385,4	100,5	26,3	0,0	0,0	2818,3	386,5	124,4	17,9
	A2-1/3	27,8	7,3	711,4	129,9	58,1	15,2	0,0	0,0	797,3	131,0	43,2	7,5
	A2-1/4	3,6	1,0	191,3	50,8	6,6	1,8	0,8	0,2	202,3	50,8	3,3	0,9
	A2-2/1	20,2	5,3	783,4	120,5	37,5	9,9	4,6	1,2	845,7	121,0	34,5	5,6
	A2-2/2	12,8	3,4	800,1	132,1	26,7	7,0	0,0	0,0	839,6	132,3	37,6	5,3
	A2-2/3	9,8	2,6	214,5	38,2	18,2	4,8	2,3	0,6	244,8	38,6	14,4	2,6
	A2-2/4	33,5	8,8	2036,1	259,9	62,2	16,3	7,7	2,0	2139,4	260,6	78,8	11,5
	A2-2/5	18,7	4,9	1191,6	169,5	34,7	9,1	4,3	1,1	1249,3	169,8	47,7	6,8
	A2-2/6	3,5	1,0	26,1	4,9	7,4	2,0	0,0	0,0	37,0	5,4	2,6	0,8
	A2-2/7	5,7	1,5	190,4	33,9	10,7	2,9	1,3	0,4	208,1	34,1	11,7	1,9
	A2-2/8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0
	A2-2/9	0,5	0,2	0,0	0,0	1,1	0,3	0,0	0,0	1,6	0,4	0,2	0,1
	A2-3/1	8,2	2,2	264,9	67,7	15,3	4,1	1,9	0,5	290,3	67,8	11,5	2,2
	A2-3/2	1,5	0,4	0,0	0,0	3,1	0,9	0,0	0,0	4,6	1,0	0,6	0,3
	A2-3/3	4,4	1,2	80,4	14,5	8,2	2,2	1,0	0,3	94,0	14,7	5,7	1,1
	A2-3/4	10,2	2,7	435,9	77,3	19,0	5,0	2,3	0,6	467,4	77,6	25,7	3,8
	A2-3/5	7,0	1,9	232,1	54,7	13,0	3,5	1,6	0,4	253,7	54,8	9,2	1,8
	A2-3/6	8,0	2,1	328,6	67,8	16,6	4,4	0,0	0,0	353,3	68,0	14,6	2,3
	A2-3/7	13,4	3,5	456,0	90,7	27,9	7,4	0,0	0,0	497,3	91,0	23,2	3,8
	A2-3/8	3,1	0,8	0,0	0,0	6,5	1,7	0,0	0,0	9,6	1,9	1,2	0,7
	A2-4/1	13,0	3,4	577,3	107,0	27,1	7,1	0,0	0,0	617,4	107,3	31,8	4,8
	A2-4/2	3,9	1,1	2,8	0,7	8,1	2,2	0,0	0,0	14,8	2,5	1,6	0,8
	A2-4/3	15,5	4,1	386,0	80,3	32,3	8,5	0,0	0,0	433,8	80,8	16,7	3,6
	A2-4/4	10,7	2,8	299,1	69,6	19,9	5,3	2,5	0,7	332,1	69,9	13,4	2,6
	A2-4/5	9,4	2,5	412,3	83,5	17,4	4,6	2,1	0,6	441,2	83,7	17,9	2,8
	A2-4/6	9,4	2,5	270,0	48,0	19,6	5,2	0,0	0,0	299,0	48,4	17,0	2,8
	A2-4/7	13,2	3,5	594,4	103,2	27,5	7,2	0,0	0,0	635,0	103,5	34,3	5,1
	A2-4/8	8,1	2,1	226,3	40,2	16,8	4,5	0,0	0,0	251,1	40,5	14,4	2,4
Densité 3	A3-1/1	18,1	4,8	558,5	99,1	33,7	8,9	4,2	1,1	614,5	99,6	21,0	4,3
	A3-1/2	15,2	4,0	739,6	116,0	28,2	7,4	3,5	0,9	786,4	116,3	24,5	4,0
	A3-1/3	7,7	2,0	26,5	4,9	16,0	4,3	0,0	0,0	50,2	6,8	4,2	1,6
	A3-1/4	5,1	1,4	248,7	34,1	9,5	2,5	1,2	0,3	264,5	34,2	11,9	1,8
	A3-1/5	4,5	1,2	14,7	3,0	9,5	2,6	0,0	0,0	28,7	4,1	2,4	1,0
	A3-1/6	13,8	3,6	699,8	126,4	25,7	6,8	3,2	0,8	742,5	126,7	36,2	5,3
	A3-1/7	24,1	6,4	1151,6	193,0	50,4	13,3	0,0	0,0	1226,1	193,5	54,9	8,3
	A3-2/1	11,5	3,1	144,9	43,3	24,1	6,4	0,0	0,0	180,5	43,9	11,3	2,8
	A3-2/2	12,2	3,2	456,1	85,1	22,6	6,0	2,8	0,7	493,8	85,4	19,7	3,3
	A3-2/3	14,4	3,8	408,0	82,0	26,7	7,0	3,3	0,9	452,4	82,4	24,0	4,1
	A3-2/4	11,1	2,9	159,7	65,1	20,5	5,5	2,5	0,7	193,8	65,4	7,3	2,5
	A3-2/5	20,8	5,5	974,2	142,4	43,3	11,4	0,0	0,0	1038,4	143,0	33,9	5,6
	A3-2/6	22,0	5,8	1105,4	149,6	40,8	10,7	5,0	1,3	1173,2	150,1	42,3	6,5

Densité 3	A3-2/7	9,6	2,5	460,1	81,6	17,9	4,7	2,2	0,6	489,9	81,8	26,7	3,9
	A3-2/8	8,2	2,2	325,3	59,4	17,1	4,6	0,0	0,0	350,6	59,6	6,2	1,8
	A3-2/9	20,2	5,3	433,7	91,7	42,2	11,1	0,0	0,0	496,1	92,5	24,3	4,9
	A3-3/1	7,7	2,0	358,7	69,3	16,0	4,3	0,0	0,0	382,4	69,4	17,9	2,7
	A3-3/2	6,8	1,8	273,9	48,7	12,6	3,3	1,6	0,4	294,8	48,8	16,3	2,5
	A3-3/3	23,6	6,2	805,1	142,7	49,2	12,9	0,0	0,0	877,9	143,4	49,2	7,7
	A3-3/4	13,4	3,5	376,3	78,0	24,8	6,6	3,1	0,8	417,6	78,3	13,2	3,1
	A3-3/5	19,1	5,0	909,3	140,3	39,8	10,5	0,0	0,0	968,2	140,8	41,9	6,3
	A3-3/6	16,0	4,2	677,1	113,0	29,7	7,8	3,7	1,0	726,4	113,3	38,4	5,7
	A3-3/7	24,2	6,3	1337,4	210,2	50,4	13,2	0,0	0,0	1412,0	210,8	64,3	9,3
	A3-4/1	28,7	7,5	1334,6	236,3	53,3	14,0	6,6	1,7	1423,1	236,8	77,6	11,4
	A3-4/2	20,8	5,5	1034,9	179,5	43,3	11,4	0,0	0,0	1099,0	179,9	58,9	8,6
	A3-4/3	9,2	2,4	258,0	68,9	19,2	5,1	0,0	0,0	286,4	69,1	14,1	2,5
Densité 4	A3-4/4	17,4	4,6	649,9	114,2	36,2	9,5	0,0	0,0	703,4	114,7	35,4	5,5
	A3-4/5	24,1	6,3	864,7	153,2	44,8	11,8	5,5	1,5	939,2	153,8	52,4	8,1
	A3-4/6	18,7	4,9	769,7	134,5	39,0	10,3	0,0	0,0	827,4	134,9	41,3	6,3
	A4-1/1	11,0	2,9	485,1	86,0	20,4	5,4	2,5	0,7	519,0	86,2	28,4	4,2
	A4-1/2	16,3	4,3	613,0	108,7	34,1	9,0	0,0	0,0	663,3	109,1	36,8	5,6
	A4-1/3	15,2	4,0	853,8	151,2	31,8	8,3	0,0	0,0	900,8	151,5	48,5	7,0
	A4-1/4	7,3	1,9	387,9	68,8	13,6	3,6	1,7	0,4	410,5	68,9	22,2	3,2
	A4-1/5	23,8	6,2	1273,2	225,4	44,2	11,6	5,5	1,4	1346,6	225,8	72,7	10,5
	A4-2/1	16,9	4,5	571,9	101,4	35,3	9,3	0,0	0,0	624,1	102,0	35,0	5,5
	A4-2/2	24,2	6,3	1317,7	233,3	50,5	13,2	0,0	0,0	1392,3	233,8	75,1	10,9
	A4-2/3	44,3	11,6	2232,9	395,2	82,2	21,5	10,2	2,7	2369,6	396,0	128,5	18,7
	A4-2/4	3,8	1,0	167,9	41,5	7,9	2,1	0,0	0,0	179,7	41,6	8,3	1,4
	A4-2/5	7,2	1,9	278,4	44,8	14,9	4,0	0,0	0,0	300,4	45,0	15,5	2,4
	A4-2/6	23,9	6,3	1524,1	251,6	44,5	11,7	5,5	1,4	1598,0	251,9	78,5	11,1
	A4-2/7	47,4	12,4	2930,8	512,5	88,1	23,1	10,9	2,9	3077,2	513,2	162,9	23,2
	A4-3/1	13,3	3,5	612,1	109,7	24,8	6,5	3,1	0,8	653,3	109,9	30,0	4,5
	A4-3/2	10,2	2,7	553,7	96,8	21,3	5,6	0,0	0,0	585,2	97,0	25,3	3,7
	A4-3/3	13,4	3,5	519,4	96,5	27,9	7,4	0,0	0,0	560,6	96,8	29,4	4,5
	A4-3/4	32,3	8,5	1790,0	307,6	67,4	17,7	0,0	0,0	1889,7	308,3	97,9	14,1
	A4-3/5	36,2	9,5	1763,4	276,2	75,6	19,8	0,0	0,0	1875,2	277,1	88,1	13,0
	A4-3/6	24,6	6,5	1162,7	199,4	45,8	12,0	5,7	1,5	1238,8	199,9	61,5	9,1
	A4-4/1	9,2	2,4	475,5	88,2	17,1	4,5	2,1	0,6	503,9	88,4	19,6	2,9
	A4-4/2	32,8	8,6	1919,6	295,9	68,4	17,9	0,0	0,0	2020,8	296,6	93,8	13,3
	A4-4/3	17,8	4,7	1098,0	165,5	37,1	9,8	0,0	0,0	1152,8	165,8	48,3	6,8
	A4-4/4	9,2	2,4	398,7	60,9	19,1	5,0	0,0	0,0	427,0	61,2	21,4	3,2
	A4-4/5	4,1	1,1	43,3	7,8	8,6	2,3	0,0	0,0	56,0	8,2	3,7	0,9
	A4-4/6	11,7	3,1	451,3	92,6	21,7	5,7	2,7	0,7	487,4	92,8	24,1	3,8
	A4-4/7	11,5	3,0	567,4	96,0	21,4	5,6	2,6	0,7	602,9	96,2	23,6	3,6
	A4-4/8	15,6	4,1	752,8	129,0	29,0	7,6	3,6	0,9	801,0	129,3	38,4	5,6

Biom.: Biomasse (en kg)

s: écart type

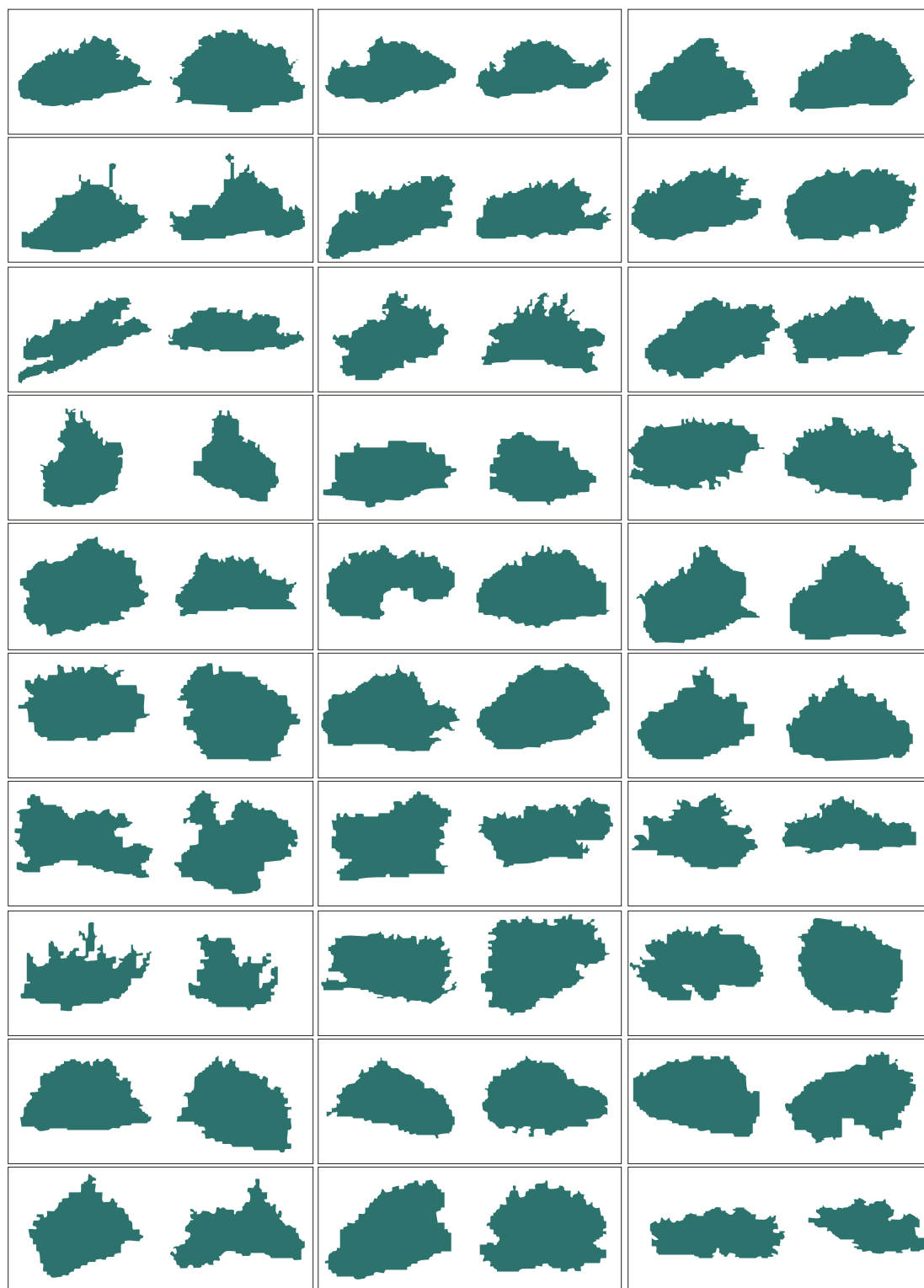
P. lign.: productivité ligneuse (en kg)

Echantillonnage des xérophytes

Espèce	N° touffe	Diam 1 (m)	Diam 2 (m)	Surf. estimée (m²)	Pds frais Ech. (g)	Pds sec Ech. (g)	Pds frais Tot. (g)	Pds sec Tot. (kg)	pds/surf (kg/m²)
Alyssum spinosum	1	0,8	0,7	0,440	6,82	4,04	3783	3,55	8,07
Alyssum spinosum	2	0,5	0,55	0,216	4,1	2,25	1921	1,85	8,58
Alyssum spinosum	3	0,45	0,55	0,194	4,82	2,39	1645	1,57	8,10
Alyssum spinosum	4	0,4	0,35	0,110	8,85	4,61	864	0,79	7,20
Alyssum spinosum	5	0,3	0,3	0,071	5,37	2,7	303	0,29	4,08
Alyssum spinosum	6	0,25	0,15	0,029	6,68	3,44	77	0,07	2,45
Alyssum spinosum	7	1,15	0,9	0,813	7,23	3,76	6018	5,61	6,91
Alyssum spinosum	8	0,65	0,4	0,204	7,01	3,97	1599	1,50	7,33
Alyssum spinosum	9	0,45	0,4	0,141	10,96	4,02	1030	0,92	6,51
Alyssum spinosum	10	0,2	0,15	0,024	7,88	4,12	93	0,09	3,66
Bupleurum spinosum	1	0,6	0,5	0,236	7,96	4,25	1853	1,72	7,28
Bupleurum spinosum	2	1,1	0,75	0,648	6,11	3,43	5553	5,24	8,09
Bupleurum spinosum	3	0,35	0,4	0,110	9,13	5,24	721	0,66	6,00
Bupleurum spinosum	4	0,3	0,3	0,071	9,96	4,81	321	0,29	4,11
Bupleurum spinosum	5	0,6	0,6	0,283	11,04	6,15	2653	2,37	8,40
Bupleurum spinosum	6	0,25	0,15	0,029	8,14	4,39	163	0,15	5,11
Bupleurum spinosum	7	0,25	0,2	0,039	8,09	4,03	174	0,16	4,09
Bupleurum spinosum	8	0,55	0,45	0,194	10,22	5,12	1457	1,32	6,77
Bupleurum spinosum	9	0,8	0,75	0,471	9,63	5,02	2836	2,58	5,47
Bupleurum spinosum	10	0,5	0,4	0,157	10,54	5,65	588	0,53	3,37
Cytisus purgans	1	0,7	0,5	0,275	10,04	5,57	3640	3,29	11,99
Cytisus purgans	2	0,4	0,3	0,094	13,18	7,63	828	0,72	7,68
Cytisus purgans	3	0,45	0,35	0,124	11,84	6,68	1255	1,11	9,00
Cytisus purgans	4	0,3	0,2	0,047	10,91	5,76	187	0,17	3,56
Cytisus purgans	5	0,18	0,15	0,021	12,36	6,14	77	0,07	3,20
Cytisus purgans	6	1,2	1,25	1,178	14,07	7	10962	9,47	8,04
Cytisus purgans	7	0,8	0,65	0,408	13,06	6,71	5639	4,93	12,08

morphotypes des arbres échantillonnés

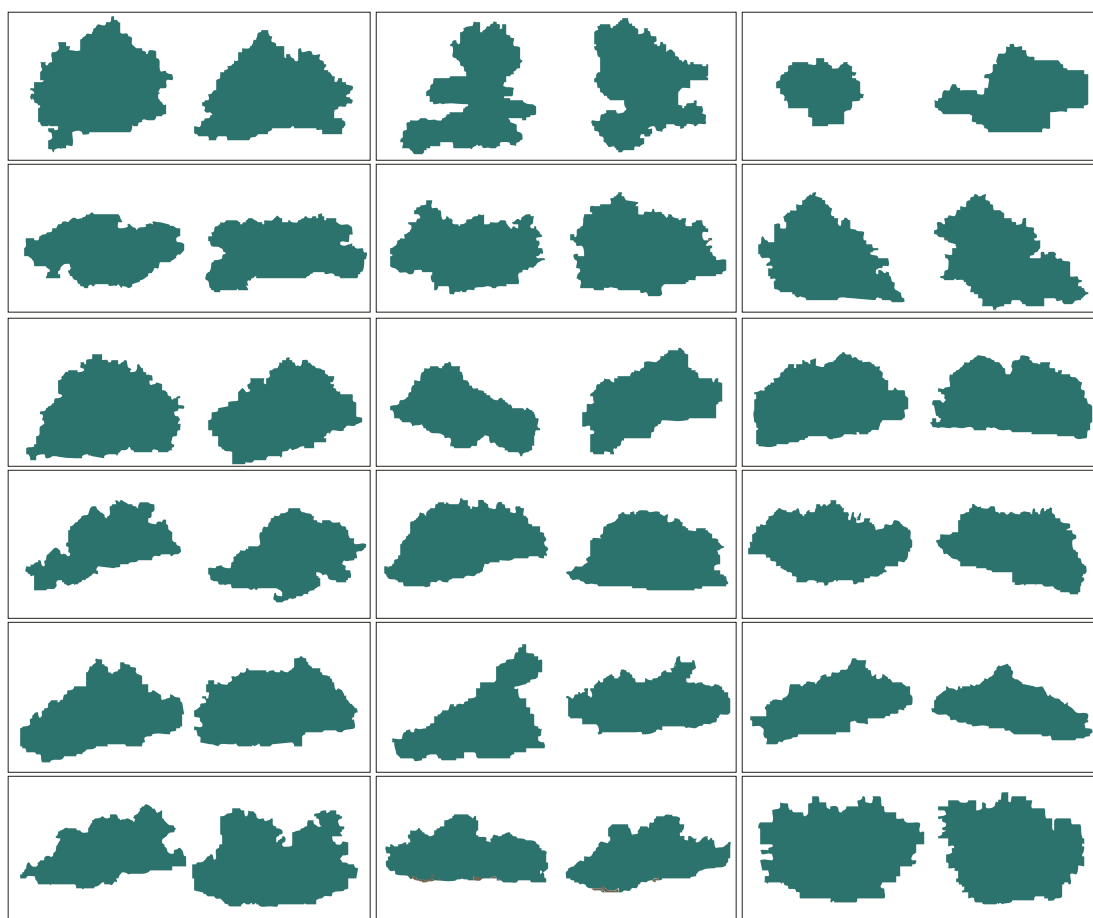
FORME Houppier au sol (H)

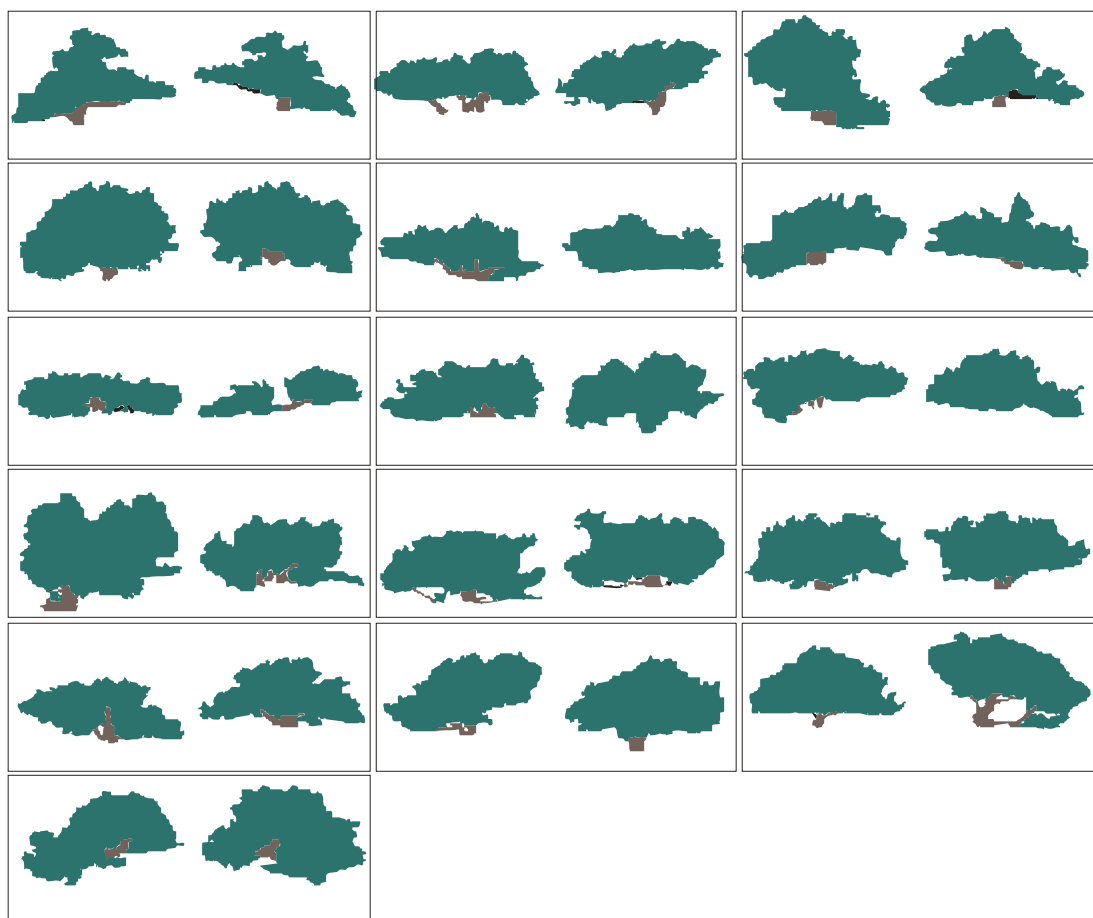
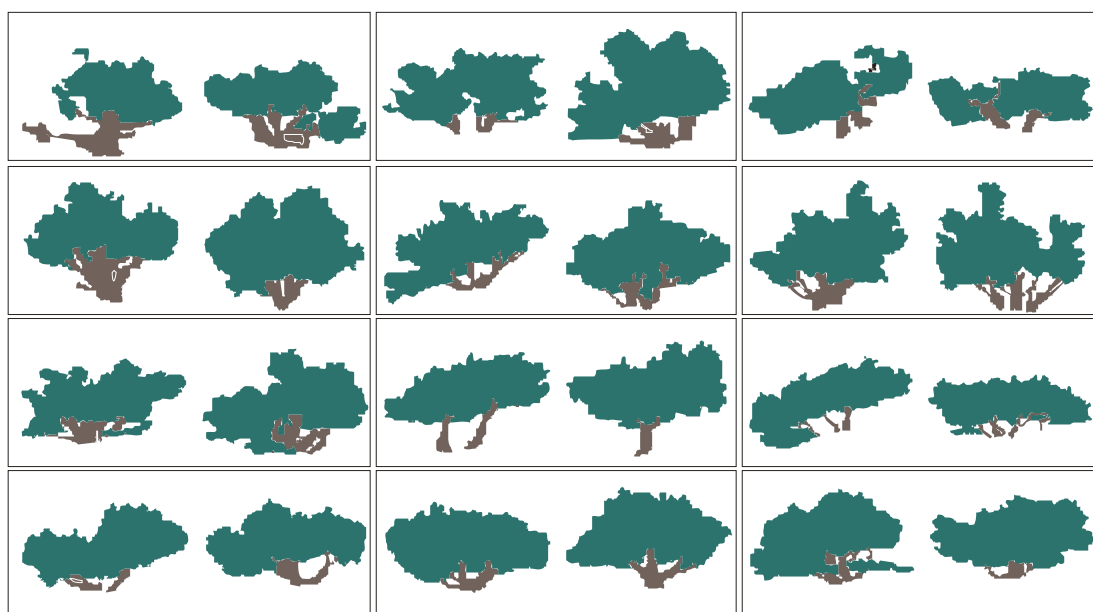


Cytisus purgans	8	0,5	0,3	0,118	10,81	5,73	1142	1,02	8,70
Cytisus purgans	9	0,4	0,4	0,126	9,41	5,37	1431	1,30	10,38
Cytisus purgans	10	0,35	0,25	0,069	12,92	7,81	570	0,50	7,27
Ormenis scariosa	1	0,35	0,35	0,096	10,76	5,68	699	0,63	6,52
Ormenis scariosa	2	0,3	0,25	0,059	7,34	3,29	356	0,33	5,63
Ormenis scariosa	3	0,17	0,18	0,024	8,51	4,76	164	0,15	6,28
Ormenis scariosa	4	0,1	0,1	0,008	8,64	4,94	32	0,03	3,75
Ormenis scariosa	5	0,4	0,25	0,079	12,24	4,86	320	0,28	3,59
Ormenis scariosa	6	0,6	0,4	0,188	9,27	4,68	1226	1,12	5,93
Ormenis scariosa	7	0,6	0,25	0,118	11,55	5,44	1084	0,96	8,18
Ormenis scariosa	8	0,2	0,23	0,036	10,17	5,14	218	0,20	5,45
Ormenis scariosa	9	0,1	0,1	0,008	9,23	5,64	42	0,04	4,89
Ormenis scariosa	10	0,4	0,5	0,157	9,56	5,33	635	0,58	3,68

morphotypes des arbres échantillonnés

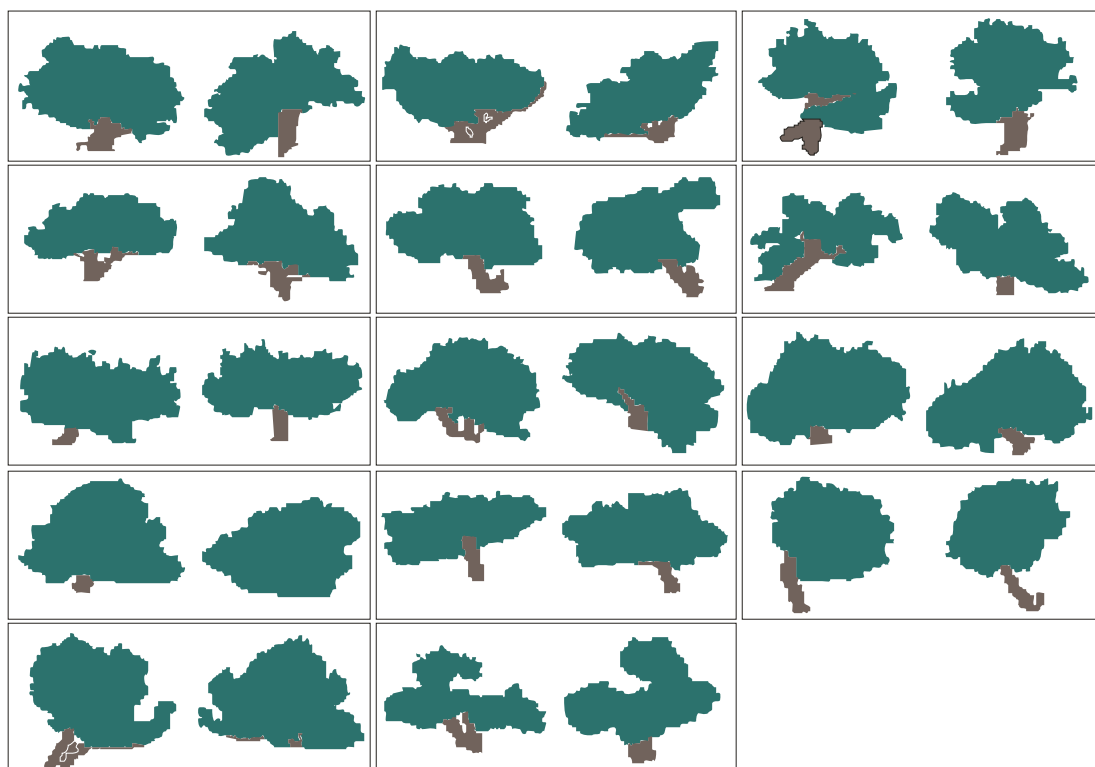
FORME Houppier au sol (H)

FORME Cierge (C)

morphotypes des arbres échantillonnésFORME Étalée (E)FORME Troncs Multiples (TM)

morphotypes des arbres échantillonnés

FORME Arborecente (A)



FORME Indéterminée (I)

