

La topoclimatologie, un outil au service de l'écologie. Applications et implications possibles au niveau de la gestion des forêts d'altitude des montagnes du Moyen et Haut Atlas (Maroc)

MUSTAPHA RHANEM

Unité de Botanique et Écologie Montagnarde, Département de Biologie, Faculté des Sciences BP 11201, Zitoune, Meknès, Maroc.

ABSTRACT – *The topoclimatology a tool for ecology. Possible applications and implications for high mountains forest management of the Middle and High Atlas (Morocco).* – Considering their smaller surface area, the high forests of the Middle and High Atlas differ from those at adjacent lower levels in that they contain a large species diversity despite their smaller structure. This heterogeneity, in addition to increased vulnerability and fragility, marks their superiority compared with lower forests. Such features are attributable to the existence of a mosaic of ecological units and local climates (ecoclimates), sometimes very restrictive, which vary sharply and rapidly from one point to another which determines that a multitude of ecological niches for tree species.

A priority for a plant ecologist is to understand for each tree species the magnitude of tolerance and optimal conditions in relation to ecological parameters. Another priority is to obtain sufficient information for the assessment of a major ecological or secondary in order to understand plant behavior in response to these factors in the field. The most critical and most relevant factors are primarily determined by climate and topography (topoclimate). One fact remains predominant in the mountains which it is possible to specify the topoclimate types and to correlate these closely with forest vegetation (especially that involving woody species), provided that human action has not excessively disrupted the natural balance

However, the low density of weather stations and poor representation of these in forests of the Middle and High Atlas constitutes a major handicap to understanding forests ecologically.

Faced with the impossibility of acquiring reliable local data to overcome this deficiency, the suggested method is based on criteria assistants, real tools of the approach, developed from the attributes or characteristics of the forest considered. Firstly, each topoclimatic compartment is defined by the combination of three variables related to the altitude, sun exposure and/or humid wind and slope parameters. In addition to these variables, we also need to add visual and tangible indicators identified in the field such as seasonal altitudinal limits of the snow (snowline), the visible aspects of the foehn (wall cloud) and radiation inversions (radiation fog). This combined set of elements allows us to characterize each topoclimatic entity. Descriptors of plant science are also included in order to supplement the gaps in our literature by providing additional information essential to the delineation and subsequent mapping topoclimates: either in relation to particularly low temperatures (spiny xerophytes in high mountain habitats) or on the moisture supply (drought-tolerant species). The proposed method sometimes also utilises geomorphology (topoedaphic influences).

Besides its interpretive value of ecological conditions, the approach presented should enable the forest manager to choose intervention methods best suited to the ecological characteristics and meet in a changing environment, the challenges of ensuring sustainable management and multifunctional potential adaptation of mountain forests. It should also contribute to the establishment of a conservation management intended to sustain and / or restore environments heritage. Finally, it can be easily implemented and does not require measuring devices. In addition, it adds value to data sets collected even limited or discontinuous.

Key words: Topoclimate, indicator, typology, mapping, forest management, High and Middle Atlas.

I. INTRODUCTION

Dans leur environnement aérien et souterrain, les arbres représentent l'essentiel en phytomasse des écosystèmes forestiers et ils offrent un support au développement de nombreux autres organismes animaux et végétaux. Cependant, comme toutes les plantes supérieures, ces espèces clé de voûte se répartissent dans leur aire naturelle

de présence en fonction de leurs exigences et sensibilités vis-à-vis des facteurs édapho-climatiques auxquels elles sont plus ou moins strictement inféodées, et ceci indépendamment de leurs origines géographiques. Ainsi, en montagne par exemple, certains arbres se réfugient à des altitudes élevées dans des endroits aux hivers très froids, d'autres au contraire se cantonnent à plus basses altitudes dans des sites aux conditions climatiques moins rudes et

moins contraignantes de sorte que la forêt est limitée pour l'essentiel par le froid (KÖRNER & PAULSEN, 2004) mais aussi par la disponibilité en eau (PIGOTT & PIGOTT, 1993; RHANEM, 2011). Il en est ainsi en région méditerranéenne où le déficit hydrique est, avec la température, l'un des éléments déterminants de la répartition des espèces arborées (QUÉZEL & BARBERO, 1982; BARBERO & QUÉZEL, 1984), même si les structures écologiques actuelles, les fonctionnements et la biodiversité résultent plus globalement des relations entre la lithologie, les sols et le climat (QUÉZEL, 1985), auxquelles s'ajoute l'influence des activités humaines (SEIGUE, 1985; QUÉZEL & MÉDAIL, 2003; WOODWARD, 2009; BLONDEL & al., 2010). Mais, ils sont aussi l'héritage d'une évolutive longue et complexe (THOMPSON, 2005). Cependant, cet héritage phytologique s'avère fragile face à la rapidité de l'ampleur des changements environnementaux en cours ou prévus sur le pourtour méditerranéen (MAZZOLENI & al., 2004), lequel est à ce titre considéré parmi les *hot-spots* du changement global (HOEKSTRA & al. 2005; GIORGI, 2006; IPCC 2007). Enfin, en concentrant près de 10 % des espèces végétales sur 1,6 % de la surface terrestre, la région méditerranéenne figure aussi au centre des enjeux de conservation de la biodiversité (REID, 1998; THOMPSON, 2005; BLONDEL & MÉDAIL, 2009).

Dans ce contexte, de par sa position en latitude à la pointe nord-ouest de l'Afrique, comme par ses contrastes

orographiques mais aussi grâce à sa situation, s'étendant sur plus de 3000 km de côte, à proximité de l'océan Atlantique et secondairement de la Méditerranée (Fig. 1), le Maroc jouit d'un climat méditerranéen varié où les différences de température et de précipitations sur l'ensemble du territoire découlent principalement des effets conjugués de la latitude, de l'influence maritime et du relief, dont la présence et la variété du modelé engendrent à leur tour une diversification des climats locaux.

Compte non tenu, dans une première approche, de l'influence topographique, on constate, indépendamment des reliefs montagneux, que les régions situées à l'ouest et au nord subissent les effets des entrées océaniques et méditerranéennes, mais parfois aussi ceux des invasions d'air chaud humide SW en provenance des régions tropicales. Cependant, dans les zones côtières, en plus des précipitations verticales normales liées aux perturbations, les peuplements forestiers, grâce à l'importance de leur biomasse aérienne et des dimensions des arbres, principaux éléments constitutifs de leur structure, y captent et récupèrent en condensant l'humidité des bouillards qui se déplacent horizontalement entretenant un état hygrométrique élevé de l'air et ajoutant des dizaines de millimètres d'eau par an à l'écosystème. Ces apports supplémentaires arrivent au sol soit directement par égouttement des surfaces végétales, soit par écoulement

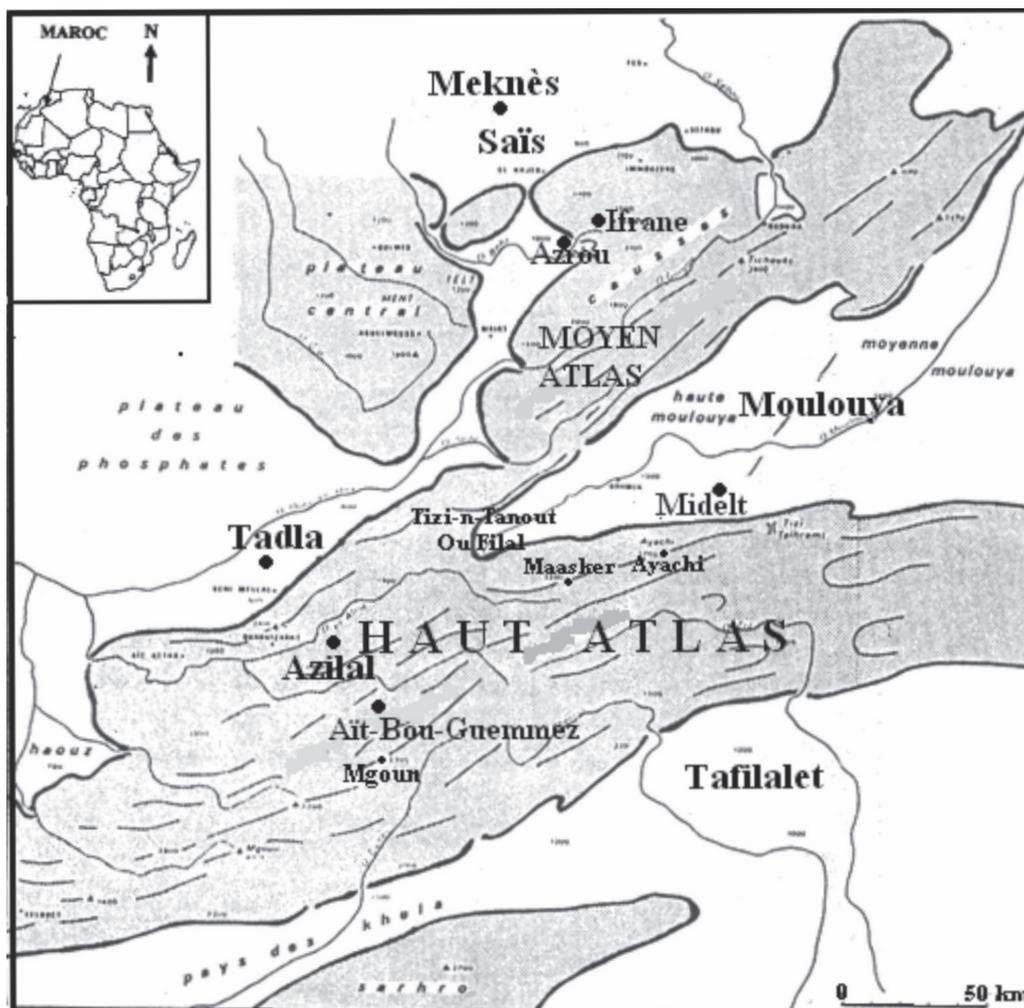


Fig. 1 – Localisation des massifs montagneux prospectés dans le Moyen et Haut Atlas (régions de Meknès-Tafilalet et Tadla-Azilal).

le long des troncs. En revanche, cette océanité s'affaiblit lentement vers l'intérieur des terres à mesure que l'on s'éloigne des rivages, et est progressivement relayée, à l'est et au sud, par des influences continentales et sahariennes. Finalement, il en résulte un fort gradient décroissant des précipitations d'ouest en est et du nord au sud, auquel se superpose un gradient décroissant de diversité en espèces ligneuses.

À l'intérieur de cette continentalité plus ou moins marquée, les chaînes atlasiques et rifaines plus ou moins élevées (celle du Haut Atlas étant la plus puissante en longueur, largeur, altitude moyenne) transforment brutalement cette dissymétrie climatique en exacerbant les contrastes entre les régions basses et les hauteurs tant pour les valeurs des températures, des précipitations, des vents que pour les régimes annuels de ces divers éléments. Par ailleurs, ces masses montagneuses, allongées grossièrement SW-NE, portent de ce fait des versants au climat bien contrasté (ubac et adret). Cette disposition générale leur permet aussi de jouer le rôle d'un immense écran protecteur vis-à-vis des vents d'air humide NW, les plus fréquents, en interceptant leurs eaux. Inversement, les régions situées sur leur versant sud ou au pied de celles-ci bénéficient d'un climat relativement plus chaud et plus sec impliquant un déficit hydrique nettement plus marqué. Il résulte de ces facteurs que les basses plaines atlantiques et les ubacs exposés aux vents pluvieux sont généralement propices à l'apparition d'une forêt aux arbres relativement serrés, surtout dans les parties externes des massifs (Photo 1). Par contre, les adrets, vallées et bassins intérieurs abrités situés sous le vent, peu arrosés et bénéficiant d'un effet de foehn, portent des forêts lâches, souvent très clairsemées et discontinues (Photo 2).

À côté de ces caractéristiques, il convient encore de remarquer que les massifs montagneux, en raison de leur masse différente, de leurs formes, de leur orientation, de leur place au Maroc présentent un certain nombre d'originalités. Ainsi par exemple, concernant la variable latitude, on relève plus de 6° de différence entre les deux extrémités de cet ensemble montagneux. Il en résulte notamment des translations altitudinales les limites des étages de végétation homologues. C'est ce qui fait que la limite inférieure de l'étage montiméditerranéen, représentée par celle de la

cédraie à *Cedrus atlantica* Manetti (cèdre de l'Atlas), se trouve du nord au sud à 1400 dans le Rif, à 1800 dans le Moyen Atlas et à 2200 m d'altitude dans le Haut Atlas (chiffres moyens arrondies bien entendu).

L'interaction entre tous ces éléments a fait naître une grande diversité forestière au Maroc en termes de composition, de structure et de fonction, laquelle s'exprime également à différentes échelles spatiales allant de celle du paysage à celle des groupements végétaux propres aux différents écosystèmes forestiers présents par exemple sur un versant (Photos 1 et 2). Notons cependant qu' hormis de rares exceptions, dont en particulier la subéraie à *Quercus suber* L. (chêne-liège) de la Maâmora et l'arganeraie à *Argania spinosa* (L.) Skeels (arganier) du Souss, il n'existe pratiquement plus de forêts ailleurs dans les basses plaines. L'essentiel de celles-ci se trouve actuellement reléguer aux montagnes du Rif, Moyen et Haut Atlas ainsi que sur les chaînes du Maroc oriental où elles sont plus ou moins épargnées (du fait des difficultés d'accessibilité et d'une faible densité de populations) que ces forêts planitiaires « résiduelles » (autrefois plus étendues et moins fragmentées) dont le morcellement et la raréfaction sont le résultat de la pression constante et soutenue exercées par l'exploitation forestière, le pâturage, les incendies et à la déforestation, réalisée au profit de la mise en culture et/ou de l'urbanisation croissantes des populations.

Or, en dépit des pertes de la couverture forestière affichées en maints endroits du Maroc, les forêts restantes dans ces montagnes représentent une composante majeure de son capital nature *sensu* (KAREIVA & al., 2011). Il n'en reste pas moins que dans ces milieux, suite à la conjonction entre aléas, qu'ils soient abiotiques ou biotiques, discrets ou continus, et vulnérabilité d'une ou plusieurs essences, de certains écosystèmes ou peuplements, les risques de dysfonctionnements (HARTMAN & al., 1991; MANION, 1991; SINCLAIR & LYON, 2005; GAUQUELIN, 2010; NAGELEISEN & al., 2010; SAINTONGE & al., 2011) plus ou moins chroniques, touchant la vitalité et l'équilibre écologique sont augmentés du fait, d'une part, d'une démographie en nette croissance avec comme corollaire la progression des activités agrosylvo-pastorales à tel point par exemple que dans certaines situations la charge pastorale et la pression sur les arbres



Photo 1 – Cédraie dense bien-venante surplombant la ville d'Azrou dans le Moyen Atlas. Localisée sur un escarpement frontal entre 1600-1800m, elle reçoit de plein fouet par temps perturbé les masses d'air océaniques.



Photo 2 – Cédraie de l'ubac du Maasker dans le Haut Atlas de Midelt mais décalée à des altitudes plus élevées (2200-2500 m). En situation orographique encaissée, elle succède à une illiciaie sèche laquelle surmonte une junipéraise piémontaise mixte présteppe à *Juniperus thurifera* L. et *J. Phoenicea* L. aux arbres très clairsemés.

pour alimenter le bétail et satisfaire les besoins domestiques est devenue très supérieure aux possibilités des milieux, et d'autre part, en raison des changements climatiques (RHANEM, 2011). Si généralement, ces perturbations restent localisées, on constate que, lorsque plusieurs de ces contraintes se conjuguent, les effets cumulés peuvent se traduire par une dégradation graduelle, parfois brutale, de ces forêts de montagne d'où un affaiblissement accru en découlant, et ce d'autant plus qu'elles constituent des écosystèmes fragiles, soumis à des agressions diverses liées étroitement aux conditions du milieu physique. On conçoit dès lors que la moindre modification de ces conditions peut entraîner un déséquilibre plus ou moins grave, qui à son tour peut conduire, pour les cas extrêmes, à l'extinction irréversible de la végétation arborée, favorisée en cela par les difficultés critiques auxquelles celle-ci est très souvent confrontée lors de la régénération, en particulier au moment de la germination et survie des plantules. Certaines essences voient ainsi reculer fortement le nombre, l'étendue et/ou la richesse en individus de leurs stations (RHANEM, 2010 a et b). Encore convient-il à ce sujet d'observer que beaucoup de peuplements d'âges très avancés sont actuellement en état de simple survie et destinés aussi à disparaître dans un futur proche en raison de l'hyperdégradation du sol qui met à nu les souches et fragilise les arbres d'autant plus qu'ils sont probablement multiséculaires et donc ont perdu une grande partie de leur immunité naturelle. Très nombreux sont les exemples qui permettent d'appréhender un tel phénomène qui s'observe tout particulièrement au niveau de la *timberline* supérieure (RHANEM, 2010 a).

Dans leur ensemble, les forêts de ces montagnes sont relativement bien conservées et regroupent une variété d'écosystèmes forestiers distincts exploités en multi-usages, et qui se caractérisent par un stock dendrologique issu de migrations holocènes et actuellement en adéquation avec l'éventail des conditions topoclimatiques offertes, la présence d'espèces rares ou encore un taux d'endémisme, plus importants qu'en plaine. Elles ont à ce titre une valeur écologique intrinsèque et biopatrimoniale, qui n'ont d'égale que sa valeur économique comme source de bois, et aussi comme lieu de pâture.

Les causes de cette diversité sont multiples. On distingue celles relatives aux conditions du milieu et celles étroitement liées aux propriétés inhérentes aux forêts. Pour ce qui est de ce dernier aspect, en plus de la diversité entre espèces arborées, il existe aussi des variations entre individus d'une même essence que l'on peut souvent constater à l'œil nu sur le terrain par la seule observation de leur apparence révélée par des caractères phénotypiques de vigueur et de forme comme la rectitude du tronc ou encore ceux portant par exemple sur la date du débourrement. De même, de fortes variations intraspécifiques peuvent être observées lors d'un coup de gel où tous les arbres ne sont pas identiquement touchés sur une même station alors que l'intensité du froid est homogène. Ces différences sont en partie liées à des variations de l'information génétique contenue dans les génomes des individus qui n'ont donc pas le même patrimoine héréditaire. En effet, par la reproduction sexuée, chaque individu reçoit une contribution génétique originale de chacun de ses parents de sorte qu'il porte en lui une diversité génétique. C'est ce qui fait *in fine* que les essences forestières, depuis le jeune semis jusqu'au vieil arbre, possèdent chacune leur propre séquence génétique de développement. Par ailleurs,

aux variations liées aux aptitudes individuelles, il convient également d'ajouter que ces espèces arborées, Angiospermes et Gymnospermes confondus, jouissent, à l'exception d'un nombre restreint d'espèces endémiques, d'une diversité génétique élevée (intra- et inter-populations à l'intérieur de l'aire de distribution de l'espèce considérée) et supérieure à celle de n'importe quel autre groupe taxonomique végétal ou animal (HAMRICK & al., 1992; MÜLLER-STARCK, 1995). Elles ont par ailleurs mis en place des mécanismes leur permettant d'éviter l'autofécondation ainsi que les effets défavorables de la consanguinité (KREMER, 2000). Ces caractéristiques se traduisent par une capacité, dans une population donnée, à produire d'une génération à l'autre un plus grand nombre de génotypes différents et ainsi de pouvoir répondre rapidement aux sollicitations extérieures et de s'adapter plus aisément à des conditions climatiques nouvelles, ainsi qu'aux évolutions imprévisibles de l'environnement (GOSSELIN & LAROUSSINIE, 2004; KREMER, 2005; VALADON, 2009). Cette adaptation se fait lentement, par sélection naturelle des essences forestières à tous les stades de développement, du semis à l'adulte, dont les exigences correspondent le mieux aux conditions écologiques du milieu (GREGORIUS & VON WERDER, 2002, REED & FRANKHAM, 2003). Par ailleurs, comme elles couvrent généralement de très grandes aires de distribution, vivant en populations de très grande taille et souvent continues, elles doivent faire face à une grande hétérogénéité de conditions environnementales dans le temps et dans l'espace. Ceci est rendu possible du fait de l'ampleur et l'efficacité des flux génétiques chez ces espèces, couplées à la diversité élevée rencontrée dans chaque population, qui constituent des mécanismes permettant de surmonter ces hétérogénéités spatio-temporelles de milieu (HATTEMER & MÜLLER-STARCK, 1988; MICKLER & al., 2000; MÜLLER-STARCK & SCHUBERT, 2001; HATTEMER, 1995).

Et c'est la cause extrinsèque de diversité, à savoir la très grande variété des situations écologiques que l'on rencontre en montagne, laquelle est conditionnée par la variabilité du milieu physique (climat, topographie et sol). Cette dernière intervient surtout par l'intermédiaire de trois paramètres majeurs que sont la chaleur, l'eau et les éléments nutritifs mais aussi, dans une moindre mesure, l'éclairement qui est généralement bien distribué sous climat méditerranéen. Cependant, au niveau du peuplement, la concurrence pour la lumière entre arbres voisins conditionne le développement du houppier et du sous-bois. Par ailleurs, la plus ou moins grande tolérance à l'intensité lumineuse permet de classer les essences forestières le long d'un gradient photique allant des essences de lumière nécessitant de forts éclaircissements surtout lors des stades juvéniles, aux sciaphiles ne se développant qu'en lumière atténuée. La compréhension de la différenciation du couvert arboré, enfin, doit prendre en compte la position géographique du lieu considéré qui devra être appréciée au travers de ses incidences climatiques (proximité ou éloignement de l'océan et emplacement topographique ayant un impact sur l'évolution et la circulation des masses d'air) mais aussi par rapport à l'aire de répartition spontanée des espèces arborées.

Précisons cependant que c'est l'importance et la durée des fluctuations de ces facteurs autour des valeurs optimales qui déterminent les conditions de croissance et de développement de l'arbre, et dessinent de fait son aire d'extension spécifique à l'intérieur de laquelle son comportement autoécologique peut varier selon qu'on l'observe au centre de son aire de

distribution, ou en limite (BRUSSARD, 1984; LAWTON, 1993; BROWN & al. 1996). Ainsi par exemple en limite altitudinale inférieure ou supérieure, la faible vitalité d'une espèce arborée expose celle-ci à la concurrence d'autres espèces plus vigoureuses. Il en résulte que chaque essence forestière se développe entre les limites extrêmes des valeurs de ces différents facteurs en dehors desquelles sa survie est très compromise. L'absence découlant s'explique le plus souvent par le manque ou l'excès d'un ou plusieurs facteurs constamment ou fréquemment létaux (hormis les cas de disparitions dus à l'homme). Cependant, il faut bien garder à l'esprit que l'information sur l'absence d'une espèce est aussi importante que celle sur sa présence (GODRON, 1966), mais encore faut-il bien évidemment que l'on se trouve à l'intérieur de l'aire naturelle de répartition actuelle de cette espèce. Il faut aussi tenir compte des compensations de facteurs (entre les facteurs climatiques et les facteurs édaphiques en particulier). Il faut enfin être attentif au fait que la variabilité génétique de certaines espèces est telle qu'il existe des races géographiques (écotypes), parfois très difficiles à différencier sur le plan morphologique, mais aux caractéristiques écophysologiques contrastées présentant vis-à-vis d'un ou plusieurs facteurs des exigences plus ou moins différentes, sans que l'on puisse incriminer les compensations évoquées. L'exemple de *Pinus pinaster* Ait. (pin maritime), dont la taxinomie reste encore controversée, est particulièrement pertinent à cet égard. Sa plasticité écologique tant sur le plan climatique que sur le plan édaphique est couramment liée à une assez grande variabilité génétique qui n'a commencé à être étudiée que récemment.

L'ensemble de ces facteurs environnementaux et génétiques concoure à créer une très grande variété d'écosystèmes forestiers dans la typologie desquels le phytoécologue s'efforce de sérier les diverses catégories de situations et d'en dégager les critères d'une classification aussi naturelle et écologique que possible. Par exemple à l'échelle du globe, l'autoécologie des arbres forestiers ainsi que la distribution et la structuration des types de forêts s'inscrivent dans des séquences climatiques déterminées du nord au sud par la latitude (TUHKANEN, 1980; WOODWARD, 1987; BRECKLE, 2002; GUREVITCH & al., 2006; LOMOLINO & al., 2010). En revanche, au sein des régions climatiques, la répartition des forêts est sous la dépendance de facteurs locaux de nature topo-édaphique et géomorphologique incluant aussi des aspects climatiques (HOWARD & MITCHELL, 1985; KRUCKEBERG, 2002; SCHULTZ, 2004; PERRY & al., 2008; BAILEY, 2009).

À l'échelle du Maroc, en dépit des connaissances acquises, pour la caractérisation de ces types de forêts, sur sa composition et sa structure, force est de constater que leur étude phytosociologique et phytoécologique a été relativement moins abordée à des échelles spatiales plus grandes, en particulier en montagne, où l'organisation du relief intervient dans la répartition des écosystèmes forestiers à travers son influence sur les conditions climatiques, dont l'impact est essentiel. La démultiplication topoclimatique qui en découle se double ainsi d'une marqueterie d'écosystèmes forestiers où seuls les facteurs décisifs, clairement perçus, sont capables de fournir aux gestionnaires forestiers les informations nécessaires à la conduite des interventions sylvicoles. Leur méconnaissance ou leur non-respect délibéré peut être parfois à l'origine d'échecs ou de difficultés de gestion plus ou moins graves.

Notre objectif n'est cependant pas de décrire les forêts de

ces montagnes, mais de mettre en relief, à l'aide de quelques exemples particulièrement démonstratifs pris dans le Moyen et Haut Atlas, les questions générales d'ordre édapho-topoclimatique qui s'y rapportent. Nous examinerons, du point de vue écologique, les principaux facteurs qui influent sur les topoclimats de ces zones montagneuses auxquels les essences forestières se sont plus ou moins bien adaptés, et les processus par lesquels ces conditions écologiques viennent à différer, souvent de façon marquée, à partir des caractéristiques climatiques régionales.

En fait, ce travail sur les forêts d'altitude des montagnes du Moyen et Haut Atlas vise un double objectif : d'une part, proposer au phytoécologue une démarche applicable sur le terrain, en vue de parvenir à l'identification et au repérage des différents topoclimats qui permettent de cerner au mieux l'autoécologie des essences forestières et, d'autre part, mettre à la disposition du forestier des éléments facilement utilisables, simples, fiables et performants de diagnostic du milieu qui, couplés avec une connaissance de la sylviculture et du matériel génétique, l'aideront à prendre la meilleure décision en termes d'aménagement forestier, de travaux sylvicoles ou de choix des essences lors d'une régénération, lequel requiert une analyse écologique fine. Concernant ce dernier aspect, avec le choix des essences, l'aménagiste prépare la santé de la forêt de demain; les erreurs commises dans ce domaine causent des dommages importants, se révèlent avec plus ou moins de retard et compromettent non seulement le fonctionnement de la forêt mais aussi de sa pérennité. Le dysfonctionnement s'accroît encore lorsqu'il s'agit de reboisement avec des provenances d'une autre région que locale de l'aire géographique de l'espèce mais inadéquates avec les conditions écologiques de leur nouveau milieu. Les seuls facteurs édapho-topoclimatiques peuvent alors réduire à néant les espoirs fondés sur une reforestation exotique.

Les résultats présentés proviennent d'une série d'observations régionales menées depuis 1984 dans certains massifs forestiers des montagnes marocaines du Moyen et Haut Atlas. Nous essaierons de dégager les concepts les plus opérationnels qui permettent d'analyser et d'expliquer (au moins *pro parte*) les différents processus mis en jeu, et d'aider, d'une manière générale, à l'élaboration des outils de description topoclimatique d'un milieu complexe qui soient à la fois justes, faciles à utiliser, et d'une précision adaptée aux besoins des phytoécologues et des forestiers.

II. MATÉRIEL ET METHODE

A. Définition des limites des forêts d'altitude concernées

Les chaînes montagneuses du Moyen & Haut Atlas (Fig. 1) constituent, par leur étirement latitudinal et leur variation altitudinale ainsi que leur complexité topographique, édaphique et géomorphologique, un *hot spot* de diversité végétal (MÉDAIL & QUÉZEL, 1997). De plus, en raison de leur allongement SW-NE, elles offrent d'excellents exemples permettant d'appréhender les phénomènes topoclimatiques. Cependant, en regard des champs thématique et géographique à considérer, nous nous limiterons volontairement au cas des forêts d'altitude, celles qui connaissent un enneigement intermittent plus ou moins important, et où le manteau neigeux s'installe pour quelques jours au moins (hiver),



Photo 3 – Étage asylvatique supraforestier sur l’Ayachi. Sa limite inférieure oscille entre 2500 et 26000 m, il est constitué d’une formation basse à xérophytes épineux en coussinets. Photo prise à 2100 m à l’ouest du cirque de Jaafar.



Photo 4 – Vue circonstanciée sur l’étage asylvatique de haute montagne du flanc nord du Mgoun (4068 m) repérable à ses deux cirques à empreintes glaciaires et ses deux horizons caractéristiques : le premier débute à 2700 m, est constitué de xérophytes épineux en coussinets alors que le deuxième commence vers 3800 m et n’est composé que d’hémicryptophytes en très petit nombre d’individus ; le reste de la surface étant occupé par la roche nue, des moraines et des éboulis périglaciaires plus ou moins mobiles. Vue à partir de l’amont de la vallée d’Arous (Haut bassin de l’oued Lakhdar).

voire plusieurs semaines (printemps) sur le sol. En hiver, nos observations permettent de fixer la limite inférieure d’établissement d’un tel couvert neigeux temporaire et discontinu aux alentours de 1700 m d’altitude qui correspond à l’isohyète 400 mm (RHANEM, 2011). Par contre, leur limite supérieure coïncide avec le seuil inférieur du manteau nival plus ou moins persistant durant le printemps. Se situant aux alentours de 2700 m d’altitude, ce dernier forme un seuil phytoclimatique bien tranché au-delà de laquelle les arbres font naturellement défaut. Ceux-ci sont en effet supplantés par des paysages asylvatiques sur le haut de pentes des longs versants du Moyen et Haut Atlas (Photos 3 et 4).

Notons cependant que de grandes étendues relativement moins élevées peuvent être également dépourvues d’arbres comme c’est le cas par exemple dans la haute plaine de la Moulouya s’étendant de part et d’autre de la lisière inférieure forestière des versants atlasiques qui l’encadrent en raison principalement des conditions écologiques qui leurs sont défavorables (Photo 5). Dans de telles conditions, cette distinction physiologique rend plus facile le repérage de la limite inférieure des forêts d’altitude. Toutefois, ce n’est pas une règle générale à ces hauteurs comme ça l’est en haute montagne.

Il convient encore de souligner que dans les montagnes du Rif et du Maroc oriental, en raison d’une moindre extension altitudinale, la couverture forestière s’étend presque partout jusqu’aux sommets. Ainsi en va-t-il par exemple dans le Rif où le cèdre de l’Atlas, forme rabougrie ou en état de squelette certes, atteint la crête du jbel Tidighine (2440 m), point culminant de la chaîne. Pour le moment, on remarquera simplement que cette limite supérieure des arbres est à attribuer aux violentes contraintes climatiques qui règnent au niveau ces biotopes.

Enfin, il importe d’indiquer aussi qu’en raison de leur plus ou moins grande longévité et de leur relative stabilité dans le temps, seules les espèces ligneuses spontanées seront abordées comprenant tous les arbres (qu’ils soient destinés ou non à la production de bois), mais aussi les arbustes, les arbrisseaux, les sous-arbrisseaux et les espèces pérennes suffrutescentes ainsi que certaines lianes.

Les seuils moyens donnés ci-dessus varient évidemment en fonction des conditions locales. La durée de l’enneigement, très variable selon les années, varie, en

fonction de l’altitude, de la latitude, de l’exposition et de la continentalité, entre deux et quatre mois en moyenne. Il en est de même de la sécheresse estivale qui dure entre un et deux, pour le bioclimat perhumide, notamment sur les massifs frontaux de la région d’Ifrane (PUJOS, 1966), et cinq mois, sur les marges du bioclimat aride, comme cela s’observe sur le revers méridional du Moyen Atlas (RHANEM, 2011).

Ainsi délimitées, ces forêts d’altitude couvrent tout l’étage montiméditerranéen et empiètent largement, vers le bas, sur l’horizon supérieur de l’étage méditerranéen supérieur et, vers le haut, sur le sous-étage inférieur de l’oroméditerranéen, essentiellement à bioclimats semi-aride, humide et perhumide. Elles présentent de fait une hétérogénéité des plus remarquables, où les limites supra- et infra-forestières se définissent indépendamment de l’essence arborée soit en fonction de la rigueur hivernale (froid combiné au vent très violent), soit du fait de la longueur de la saison sèche. Cette large bande forestière est partout encadrée par la timberline normale en haut, alors qu’elle ne l’est que rarement par la limite des steppes en bas.

Ces peuplements arborés naturels moyen- et haut-montagnards sont relativement réduits spatialement comparés aux types de basse montagne en raison de la diminution du volume montagneux avec l’accroissement de l’altitude. Ils n’en traduisent pas moins, par leur adaptation au climat, l’hétérogénéité bioclimatique méditerranéenne: fortes variations spatiales, à l’échelle locale, de la moyenne des températures minimales du mois le plus froid (m), des précipitations annuelles et interannuelles moyennes et des durées de la sécheresse et de l’enneigement. Par ailleurs, plusieurs essences sont susceptibles d’y offrir un développement important, voire exclusif comme c’est le cas du cyprès de l’Atlas (*Cupressus atlantica*) dans le Haut Atlas occidental au sud de Marrakech.

Outre les considérations précédentes, ces écosystèmes arborés d’altitude offrent par ailleurs une plus grande richesse floristique (cf paragraphe infra), mais aussi



Photo 5 – Étage asylvatique infraforestier à *Stipa tenacissima* L. au piémont de Massif de l'Ayachi (1700 m). Représenté par le glacis graveleux de la Moulouya, la présence d'une dalle très peu fissurée ou perforée à faible profondeur affleurant par endroits doit probablement gêner le développement et la pénétration des racines pivotantes des arbres, et diminuent par ailleurs la teneur en eau utile du sol, milieu d'autant plus contraignant que les précipitations sont insuffisantes.



Photo 6 – Envahissement au pied du massif de l'Ayachi à 2100 m d'altitude des zones défrichées à des fins agricoles et/ou surpâturées du sous bois de l'yeuseraie par des espèces toxiques ou épineuses et des nitrophiles, avec réduction du cortège à une ou deux espèces.

un développement et une diversification écologique considérables en raison de la complexité de l'édifice topoclimatique infiniment plus importante que celle offerte par les niveaux inférieurs adjacents. En effet, à mesure que l'on s'élève, l'atmosphère est moins dense et n'absorbe que peu d'énergie; la majeure partie du rayonnement solaire est donc absorbée par le sol de sorte que la différence de température entre le sol et l'atmosphère libre augmente au profit du premier en particulier sur les adrets. De plus, ils répondent le plus souvent à des divisions topoclimatiques précises que l'on peut facilement mettre en évidence sur le terrain. Il conviendrait cependant de ne pas conclure précipitamment au manque d'intérêt des écosystèmes des niveaux attenants qui présentent autant de valeur que les précédents avec toutefois moins de diversité et une faible productivité.

B. De quelles forêts parle-t-on?

Seuls ou mélangés entre eux, les arbres constituent sur les montagnes du Moyen et Haut Atlas une large gamme de formes forestières que l'on peut répartir sur les trois ensembles physiologiquement très différents définis par BARBERO & al. (1990): forestiers, pré-forestiers et pré-steppiques. En effet du fait de la variété de leurs types biologiques, la concurrence inter et intraspécifique à l'intérieur de ces peuplements y induit une certaine structure, horizontale et surtout verticale, qui constitue un attribut propre à chaque écosystème forestier Cette structure verticale peut être simple ou complexe du fait de l'existence d'arbres d'âges différents et de l'enrichissement en espèces arbustives, buissonnantes et herbacées. En revanche, la structure horizontale est sous la dépendance de la densité et la distribution des arbres vivants (et morts), ainsi que celles des différentes espèces appartenant aux strates subordonnées. Associé à la diversité des essences arborées, cette structuration verticale et horizontale, spécificité du milieu forestier, est le fondement même de sa diversité biologique dans son ensemble englobant tous maillons des réseaux trophiques, car toute sa dynamique et sa pérennité

en dépendent, même si toutes les espèces ne sont pas nécessaires à son fonctionnement biogéochimique (PURVIS & HECTOR, 2000).

D'autre part, les espèces arborées ont l'avantage de bien intégrer les conditions du milieu à la fois dans l'espace et dans le temps du fait de la dimension importante de leur appareil végétatif et de leur longévité, ce qui fait généralement de ces écosystèmes le terme optimal du dynamisme végétal (BOURNERIAS, 1982; GEHU & GEHU-FRANK 1986; BLONDEL, 1999). Bien entendu, et au risque de rappeler une évidence, il convient de souligner que ces écosystèmes naturels forestiers, caractérisés par un fonctionnement de tous les instants où chaque groupe fonctionnel y joue un rôle déterminant, sont en équilibre dynamique avec les conditions moyennes actuelles du climat et avec le sol, mais sont capables de résister aux actions extérieures susceptibles de les altérer (à condition que ces actions ne soient pas totalement destructrices) et de maîtriser ainsi les fluctuations du milieu (homéostasie). Ils ont par ailleurs une incontestable capacité d'évolution et d'adaptation continue à de nouvelles conditions de milieu grâce des systèmes d'autorégulation, du moins à l'intérieur de certaines limites (BOURNERIAS, 1982; NÈGRE, 1982; RAMEAU, 1999; LE TACON & al., 2000 & LE TACON & al, 2001) dans la mesure où le climat n'est plus un invariant séculaire, mais varie, au-delà des fluctuations annuelles, en tendance sur des périodes proches de la décennie. Autrement dit, les arbres ne vivent jamais dans les milieux de leurs parents.

Sur les montagnes du Moyen et Haut Atlas comme partout ailleurs au Maroc, de telles forêts naturelles, proches de l'état climacique, les véritables états de référence révélateurs de l'aboutissement naturel de l'évolution de la végétation, où l'homme n'est jamais intervenu ou, dans ce cas, après plusieurs siècles d'abandon de toute action anthropique, sont absentes. Toutes les forêts sont en effet plus ou moins anthropisées par des traitements dommageables, ce qui les a empêchées d'aller jusqu'au bout de leur autodynamisme comme par exemple le fait de couper des arbres mûrs ampute le cycle sylvigénétique de ses phases de vieillissement et d'écroulement, autrement dit de près de la



Photo 7 – Cédraie haute de l’ubac du Maasker formée de grands individus âgés de *Cedrus atlantica* Man. lesquels présentent une longueur et un étalement des branches des plus remarquables. La limite supraforestière (2600 m) est bien tranchée, marquée par le passage brutal de la forêt à la steppe par suite des pentes très fortes à raides et du gradient écologique extrêmement rapide en découlant.



Photo 8 – Vue rapprochée sur la cédraie haute du Maasker. De très grande taille, les vieux cèdres à croissance très lente arrivent encore à se maintenir bon gré mal gré surtout grâce à leur enracinement très robuste et leur fort ancrage dans le sol. Ils vivent donc plus longtemps et meurent plus tardivement.

moitié de sa dynamique naturelle (ANDRÉ, 1997; BLONDEL, 1999). Cela les prive aussi de la chaîne des décomposeurs impliquant le bois pourri sur lequel s’installent aisément les semis lors de la phase de renouvellement (SCHAETZL & al., 1989; ANDRÉ, 1997), souvent interrompu par un pâturage permanent et continu. En conséquence, ces forêts sont plus ou moins éloignées de l’état climacique. C’est en fait le cas de la grande majorité des forêts marocaines où, en plus de l’action anthropique, elles subissent aussi celle des animaux pâturants dont les effets peuvent être très dommageables (Photo 6).

En revanche, beaucoup plus rares sont les forêts se rapprochant le plus de leur état naturel et encore présentes aujourd’hui. Réduites à l’état de lambeaux, elles sont restreintes à quelques haut versants telles que l’on en peut trouver par exemple dans le Haut Atlas, et qui correspondent à de vieilles cédraies (Photos 7 et 8) à caractère semi-naturel où l’origine du cèdre est spontané, c’est-à-dire non semée et non planté. Leurs autres manifestations sont la forte présence d’arbres sénescents, de vieux arbres et l’accumulation de grandes quantités de bois mort sur pied ou au sol. En outre, l’homme y intervient, depuis des siècles, par des prélèvements de bois, parfois de façon extrêmement brutale, mais n’a pas encore fondamentalement modifié la nature des essences, ni la structure des peuplements. On pourrait s’attendre à ce que ces écosystèmes, très proches de leur état initial, et qui semblent en équilibre avec les conditions du milieu, présentent une bonne stabilité. Or il n’en est rien. Ces cédraies sont en fait très sensibles et leur vulnérabilité dépend de plusieurs facteurs ayant engendré des dysfonctionnements graves qui se sont répercutés sur les cycles biogéochimiques, ce qui fait penser qu’un ou plusieurs seuils d’irréversibilité écologique ont pu être franchis (VALLAURI & CHAUVIN, 1997). Outre le fait qu’il n’y a strictement aucun jeune arbre ni de cèdre ni d’aucune autre essence arborée qui pourrait constituer une strate sous arbustive ou arbustive, elles sont peu diversifiées et présentent une simplification structurelle équienne par laquelle tous les cèdres ont approximativement le même âge. De fait, cet écosystème peut rapidement basculer vers un état de dégradation qui peut aller jusqu’à la disparition des derniers grands cèdres (ce que l’on observe par endroits), la

steppe à xérophytes épineux risque alors de s’étendre encore plus; la cédraie en tant qu’écosystème, est alors morte, et ceci pour de très longues décennies, à moins d’interventions artificielles toujours plus coûteuses, et parfois incertaines. Ajouté à cela le fait que la mauvaise adéquation entre l’environnement local actuel très contraignant et les exigences écologiques du cèdre aboutit à un déséquilibre de la cédraie. Cette inadéquation du cèdre à son milieu est concrétisée par l’absence de régénération naturelle qui constitue une étape capitale de son renouvellement, ce qui pose de fait un problème quant à son remplacement.

Les risques d’instabilité y sont par ailleurs d’autant plus grands que le cèdre est à la limite de son aire potentielle et semble très éloigné de son optimum écologique habituellement reconnu. Il se trouve ainsi de plus en plus affaibli et est fortement sujet à des maladies, ravageurs ou autres perturbations. Un des exemples étudiés en détail est celui des lentes modifications climatiques qui affectent toute la région (RHANEM, 2011). En effet, par suite de l’abaissement de la pluviosité et de l’augmentation des températures, les déficits hydriques estivaux s’aggravent et les jeunes semis de cèdre ont de plus en plus de difficultés à résister à la sécheresse. Ces difficultés d’installation des semis de cèdre ont pour corollaire un vieillissement excessif. Le recul du cèdre le long de sa bordure méridionale Moyen-Atlasique relève des mêmes facteurs (RHANEM, 2011).

En outre, en raison de plan gestion et d’aménagement inappropriés mais aussi de l’absence quasi systématique de sylviculture, cet état critique menace la pérennité de cette cédraie et sa structure d’équilibre à court terme d’autant que la faible rentabilité économique des produits d’exploitation qui conduit à réserver aux meilleures cédraies les opérations sylvicoles aboutit à délaisser les autres plus nombreuses, qui, situées en conditions moins favorables, ont vu, de ce fait, leur état sanitaire s’aggraver. Pour toutes ces raisons, la réversibilité des évolutions régressives de la cédraie est impossible. En termes d’actions sylvicoles, il s’agira donc, soit de réhabiliter ces cédraies vieilles faisant office de réservoir potentiel de diversité et de capacité adaptative comme cela a été observé chez d’autres essences (MOSSELER & al., 2003) qui leur confèrent un intérêt certain dans le cadre de la conservation des ressources sylvigénétiques,



Photo 9 – Vue détaillée sur la cédraie de Tisswatine dans le Haut Atlas de Midelt. S'étendant à l'ouest du cirque de Jaafar entre 2300 et 2400 m d'altitude et colonisant une coulée de blocailles au fond d'une dépression en demi-entonnoir, ce peuplement présente une bonne vigueur et de très belles régénérations. La présence, sous ce tablier de blocailles, de terre fine qui s'engorge en eau durant la période de fonte des neiges et le reste assez longtemps, maintient un bilan hydrique favorable pour que les jeunes semis de cèdre passent la saison sèche.

soit de réinstaller de nouveaux peuplements là où le cycle sylvigénétique est arrivé à son terme, et où le cèdre a disparu. Toutefois, pour ce qui est des peuplements relictuels, d'un intérêt exceptionnel en raison de leur haute valeur biogéographique ou historique, la sauvegarde du patrimoine génétique du cèdre passe par la protection de ces groupes fonctionnels d'arbres murs, de vieux arbres, d'arbres sénescents ayant dépassé l'âge d'exploitabilité et d'arbres morts sur pieds ou au sol, contre les coupes illicites et l'incendie, mais aussi contre le pâturage. En effet, au-delà de leur rareté (RAIMONDO, 1998), si prestigieuse soient-elles, c'est aux écosystèmes, dans leur globalité, qu'une attention particulière doit être accordée car le seul moyen de préserver les espèces passe par la sauvegarde de leurs habitats (GROOM & al., 2006; RAPHAEL & MOLINA, 2007; PERRY & al., 2008).

Cependant, à l'exception de ces situations défavorables, les peuplements sont plus globalement jeunes (Photos 1 et 2) et rarement monospécifiques; il s'agit le plus souvent de peuplements mélangés généralement composés d'au moins deux essences réparties dans une ou plusieurs strates. Dans de telles formations arborées, les essences sont bien adaptées et appartiennent au climax de la station. Elles sont par ailleurs susceptibles de se régénérer naturellement (Photo 9), qui est une phase capitale de leur dynamique naturelle.

La régénération naturelle détermine en effet la structure démographique et les caractéristiques génétiques initiales des populations d'arbres appelés à évoluer sur le long terme (RAJA & al., 1998). Elle permet par ailleurs à la variabilité intraspécifique et à la sélection naturelle de s'exprimer, au profit d'une adaptation progressive des peuplements à leurs nouvelles conditions de croissance. Ce type de forêt, résultat des interactions entre des relations de compétition, le comportement des essences coexistantes en fonction des caractéristiques du milieu, représente, presque toujours, un écosystème complexe, peu vulnérable vis-à-vis des aléas naturels, et capable de procéder à de douces réajustements progressifs. En effet, en raison de leurs amplitudes écologiques différentes, ces espèces, aux caractéristiques complémentaires dans l'aire où elles cohabitent, peuvent se remplacer mutuellement, compte tenu de niches plus larges ou mieux adaptées aux nouvelles conditions locales de certaines d'entre-elles. Une telle imbrication en « écailles » (GODRON, 1967) permet donc une grande flexibilité, et une adaptation continue aux variations climatiques aléatoires, comme aux lentes modifications du climat général. Ceci est d'autant plus pertinent à l'heure où les écosystèmes forestiers doivent endurer de nouvelles perturbations consécutives au changement climatique en cours. L'exemple de l'écotone piémontais infra-forestier du revers méridional du Moyen Atlas, où les risques d'instabilité de l'écosystème sont d'autant plus grands que les essences qui le constituent sont à la limite de leur aire potentielle, est très significatif à cet égard (RHANEM, 2011). On comprend aisément que toute simplification du système génétique réduit d'autant la souplesse adaptative, et donc la résistance devant les adversités. Il est donc fortement recommandé de maintenir l'intégrité de ces écotones en veillant à la conservation des bases génétiques larges aux espèces et à la préservation de la totalité des espèces tout en évitant la détérioration de leurs habitats lors d'un éventuel aménagement.

C. Les essences constituantes et situation actuelle

Dans la région concernée par cette étude, les forêts d'altitude hébergent un assez large éventail d'essences qui se distribuent dans ce paysage montagnard en se relayant d'ouest en est et de bas en haut et offrent chacun un intérêt socio-économique, paysager et patrimonial plus ou moins important. Ce cortège arboré est essentiellement dominé par un contingent d'espèces spontanées méditerranéennes parmi lesquelles on trouve (à l'exception de l'arganier): *Cedrus atlantica* Man., *Q. faginea* Lamk (chêne zène), *Q. coccifera* L. (chêne kermès), *Pinus halepensis* L. (pin d'Alep), *P. pinaster* var. *maghrebiana* (pin maritime), *Juniperus Phoenicea*, *J. oxycedrus*, *J. thurifera* L. (genévrier thurifère), *Buxus balearica* Willd. (buis des baléares), *Fraxinus dimorpha* Coss. et Dur. (frêne dimorphe), *Lonicera arborea* Boiss. (chèvrefeuille en arbre). Mais de rares taxa arctico-alpins tel *J. communis* L. (genévrier commun) et certains éléments de souche eurasiatique (*Taxus baccata* L. (if), *Ilex aquifolium* L. (houx commun), *A. monspessulanum* L. (érable de Montpellier), *Buxus sempervirens* L. (buis sempervirent), *Cotoneaster nummularia* Fisch. et Meyer (cotoneaster nummulaire), *Prunus prostrata* Labill (prunier prostré), *Rhamnus alpina* L. (nerprun des Alpes), *Sorbus aria* (L.) Grantz (alisier commun), *S. torminalis* (L.) Grantz (alisier

torminal), *Crataegus laciniata* Ucria (aubépine laciniée), *C. monogyne* Jacq. (aubépine commune), *Viburnum tinus* L. (laurier-tin), *V. lantana* L. (manicienne ou cochène) enrichissent significativement le cortège (voir par exemple RHANEM, 2013). Enfin, cette originalité des forêts d'altitude est renforcée par la présence d'espèces endémiques, surtout au niveau de la strate herbacée. L'endémisme arboré est, quant à lui, généralement résiduel et apparaît au niveau spécifique comme c'est le cas du cyprès de l'Atlas (*Cupressus atlantica* L.).

Dans la plus grande partie de leur surface, ces forêts sont formées exclusivement par des espèces de trois genres appartenant aux Cupressacées, Pinacées et taxacées et un genre se rattachant à la famille des Fagacées qui compte à lui tout seul pas moins de six espèces. Parmi ces dernières, l'yeuse, sous ses formes arborées et arbustives, est l'essence la plus répandue mais aussi la plus étendue, recouvrant une grande variété de biotopes sur une large gamme altitudinale, loin devant le genévrier thurifère et le cèdre de l'Atlas. Plus localement, d'autres espèces arborescentes ou arbustives de la famille des Rosacées organisent enfin des écosystèmes forestiers de moindre importance.

À l'examen de leur succession altitudinale, même si la proportion est variable d'un massif à l'autre, il apparaît que les essences feuillues sempervirentes et caducifoliées dominent essentiellement dans la partie inférieure. En revanche, aux altitudes élevées, prédominent les conifères. Les aiguilles de ces derniers offrent en effet une moindre surface au gel et à la dessiccation que les feuilles larges et peuvent ainsi supporter, jusqu'à un certain seuil, les températures basses qui règnent dans ces biotopes (BIGRAS & COLOMBO, 2001). Ils sont par ailleurs mieux adaptés à une période végétative courte que les feuillus sempervirents. Enfin, aux abords de ces forêts d'altitude s'adjoignent d'autres genres, sempervirents ou caducifoliés, (*Buxus*, *Genista*, *Berberis*, *Ribes*) formant des fruticées infra- et/ou suprasylvatiques.

Il importe toutefois d'indiquer que le chêne vert participe assez souvent à l'individualisation d'écotones supraforestiers et arrive aussi à supporter des conditions climatiques contraignantes. C'est le cas par exemple aux abords septentrionaux et sur l'adret des haut versants méridionaux de la vallée des Aït-Bou-Guemmez ainsi que dans beaucoup d'autres sites du Haut Atlas, là où il bénéficie assez fréquemment des courants atmosphériques chargés d'humidité même par temps modérément perturbé, et où le genévrier thurifère, arbre de haute montagne par excellence, n'arrive pas à s'installer à cause de son intolérance à l'excès d'humidité (RHANEM, 2008 a, b, & 2010 a).

De plus, l'yeuse est aussi l'essence la plus résistante qui supporte mieux l'exploitation. Il montre aussi une résilience élevée à toutes les perturbations subies en raison de sa faculté remarquable à régénérer de souche en particulier après des coupes multiples et cela jusqu'à un âge avancé. C'est pourquoi le chêne se prête à un meilleur traitement en taillis vert pour le bois de chauffe ou pour la production de charbon de bois par le processus de carbonisation (charbonnières), au moins tant que les souches conservent leur capacité à rejeter ; son bois étant en effet plus apprécié en tant que combustible (bois ou charbon de bois) que celui des autres essences. Aussi, la surpopulation observée ces dernières décennies implique-t-elle la nécessité de reboiser au plus vite afin de satisfaire la consommation de plus en plus élevée de ce bois pour le chauffage et la cuisson.

Soulignons par ailleurs que mis à part le cas du chêne vert et celui de quelques caducifoliés comme *Berberis hispanica* et *Ribes uva-crispa*, toutes les autres essences ne sont pas adaptées au renouvellement végétatif ; néanmoins le genévrier thurifère réagit fortement à la coupe et aux mutilations et résiste longtemps au feu « grâce à un haut pouvoir de former des bourgeons adventifs » d'où le « tempérament d'acier » auquel il est souvent associé (RHANEM a, 2010). Deux autres espèces de genévriers figurent également dans ces forêts d'altitude, mais jouent un rôle plus effacé. Ce sont, par ordre d'importance quant à leur fréquence: *Juniperus Phoenicea* et *J. oxycedrus*. Ce dernier, se comportant par endroits comme une essence pionnière colonisatrice, se localise préférentiellement aux ubacs alors que le genévrier de phénicie occupe plutôt les adrets selon que la cohabitation avec d'autres essences arborées leur est propice ou défavorable. Il existe aussi divers types de pinèdes dispersées en peuplements disjoints et exigus: celles à pin maritime sont cantonnées aux zones océaniques alors que celles à pin d'Alep sont confinées aux zones internes. Mais le plus souvent, ils se mélangent isolément à d'autres essences forestières selon des proportions variables.

En terme purement forestier, en dehors du cèdre de l'Atlas et, à un degré moindre, de ceux du pin d'Alep et pin maritime, toutes les autres essences ont une valeur économique faible ou nulle en raison de l'absence de rectitude des troncs et la rareté de fûts de belle venue (grumes). Par ailleurs, des plantations de cèdre de l'Atlas effectuées avec succès dans le Moyen et Haut Atlas témoignent de l'aptitude de cette essence à coloniser des milieux nouveaux et, à ce titre, se présente comme une espèce de reboisement majeure dans l'étage montiméditerranéen. C'est le cas aussi du pin d'Alep qui est la seule essence arborescente autochtone susceptible de reconstituer en peu de temps un couvert arboré dans les milieux les plus défavorables ou fortement dégradés. Il figure ainsi parmi les essences les plus utilisées au Maroc en raison notamment de sa plasticité écologique, de sa rusticité et de la maîtrise de la production de plans en pépinières forestières et de son intérêt économique non négligeable. Il en est de même du pin maritime (écotype de montagne), doté également d'une croissance rapide au moins durant sa jeunesse, qui est considéré comme l'espèce de référence pour les reboisements en montagne, mais dans les milieux moins contraignants.

Sur le plan édaphique, le rôle fondamental revient à la structure propre de la roche mère dans le fonctionnement et les caractéristiques des substrats en raison de l'absence d'un vrai sol au sens pédologique du terme à l'exception de quelques localisations ponctuelles où il est représenté par des sols bruns et des sols rouges méditerranéens hérités plus ou moins remodelés. Bien évidemment, ces types sont limités à quelques écosystèmes forestiers peu perturbés en bioclimats sub-humide à humide : cédraie de Michlifène dans le Moyen Atlas (2000 m), cédraie d'Idikel dans le Haut Atlas (2200 m). Plus généralement, les sols sont plus dégradés et les processus pédogénétiques sont peu poussés quels que soient les matériaux parentaux. Ceci est lié, en plus de l'action anthropique, au climat relativement sec en été et froid en hiver, mais aussi aux fortes pentes et à la violence des orages. Ils sont par ailleurs d'autant plus ralentis à mesure que l'on s'élève en altitude. Il en découle que la décarbonatation est peu avancée (en témoigne la faiblesse des éléments fins argilo-limoneux). Par ailleurs, la



Photo 10 – Les diaclases remplies de terre limono-argileuse rubéfiée et d'éléments plus ou moins grossiers assurent au système racinaire du chêne vert un développement en profondeur alors que le pendage conforme des bancs de calcaires durs en dalles lui impose un enracinement superficiel et traçant. Coupe verticale du substrat à la faveur du talus bordant la RN 13 sur le revers méridional du Moyen Atlas central.



Photo 11 – Versant NE de la cluse d'Ait-Oufella sur le revers méridional du Moyen Atlas central où le substrat présente une forte variabilité sur de courtes distances vis-à-vis des aptitudes du chêne vert à l'enracinement et à l'alimentation en eau. Les conditions pluvio-thermiques étant similaires, l'yeuse y adopte à l'échelle de quelques décimètres des allures et des comportements différents selon qu'il est sur des éperons rocheux au pendage non conforme ou sur des colluvions de bas de pente. Vue près de la RN 13 qui longe la rive droite vers 1800 m.

plupart du temps, la surface du sol ne présente qu'un horizon humifère superficiel très réduit, biologiquement actif sur lequel repose une mince couche de litières mais même dans ce cas, la roche affleure à la surface en maints endroits. Plus souvent le sol est nu si bien que la diversité des types de roches peut influencer la distribution des écosystèmes forestiers directement ou au travers des produits d'altération de ces roches qui influencent la chimie des substrats dérivés ou superposés, leur granulométrie, leur texture, leur porosité, leur perméabilité qui commandent plus ou moins directement la dynamique de l'eau dans ces milieux. Aux côtés des températures et des précipitations, la disponibilité en eau est en effet un des principaux facteurs contrôlant la composition et la croissance des arbres dans les régions concernées.

Aussi, est-il plus pratique d'envisager ici l'approche de l'hétérogénéité édaphique non sous l'angle du sol proprement dit séparé du matériau originel faisant intervenir des critères pédogénétiques, mais sous celui du couple sol-substratum utilisant les caractéristiques lithomorphologiques et structurales; le sol étant la partie la plus superficielle et meuble du substratum rocheux altéré qui peut se prolonger en profondeur à la faveur de fissures (Photo 10). C'est cette tranche de terrain formée du sol tel qu'il vient d'être défini ci-dessus et de la roche mère qui sera désignée dans la suite du texte sous le terme de substrat. Ses propriétés physico-chimiques se trouvent ainsi sous l'étroite dépendance de la roche mère. Par ailleurs, étant souvent proche de la surface, cette dernière influe donc fortement sur l'enracinement des arbres (stabilité et résistance), sur la nutrition minérale et l'alimentation en eau.

De l'ensemble de ces considérations, il résulte que la structure géopédologique stationnelle ainsi caractérisée doit être prise en compte comme une entité, à laquelle il convient d'agréer, outre les caractéristiques de l'ensemble du substrat (roche, altérite ou formation superficielle, sol) des paramètres susceptibles d'influer sur sa capacité de stockage en eau comme la pente, l'exposition au regard de l'insolation, donc de l'hygrométrie, et de l'orientation aux vents humides, le pendage de la roche (conforme ou

inverse), le degré de fissuration (densité et profondeur) et d'altération ou friabilité de la roche mère (fonction de sa nature minéralogique), de la présence d'obstacles de nature pédologique (horizon concrétionné, encroûté, induré...) ou hydrologique (présence de nappe phréatique à faible profondeur), de la pierrosité, de la fraction de terre fine (qui constitue le réservoir hydrique du sol) et de la texture. Cette dernière variable est favorable lorsque la répartition des différents éléments constitutifs contenus dans la fraction inférieure à 2 mm est assez équilibrée entre les sables (2000 - 50 μm), limons (50 - 2 μm) et argiles (< 2 μm). Quant à la texture grossière, elle s'apprécie par le pourcentage de pierrailles: graviers, cailloux, pierres, blocs, dont les dimensions moyennes sont fixées par les intervalles 2 mm, 2 cm, 5 cm, 20 cm. L'interaction de ces différentes variables édaphiques et des composantes climatiques (géographiques et altitudinales) permet de définir des systèmes géopédologiques ayant chacun une dynamique propre vis-à-vis de l'eau (Photo 9) mais aussi envers des comportements mécaniques et physico-chimiques, et où le fonctionnement de l'un n'interfère pas sur celui de l'autre (Photo 11). Les différences qui en découlent de par les effets conjugués de l'ensemble de ces facteurs créent à leur tour un large éventail de conditions de bilan hydrique (favorable, moyen ou défavorable) variables dans l'espace permettant d'appréhender et donc d'expliquer certains éléments des caractéristiques de la structure forestière que chaque système géopédologique porte (RHANEM, 2011). Il ne faut pas par ailleurs perdre de vue qu'en fonction des contraintes édaphiques, les essences forestières mettent en place un système racinaire superficiel, traçant et/ou un autre plus profond qui explore le sous-sol. Les caractères de la fissuration ou le degré de friabilité de ce dernier interviennent par exemple dans l'édification d'un système racinaire profond (Photos 10 et 11). Nous avons eu parfois recours à cette relation : conditions de bilan hydrique – végétation pour affiner le tracé des limites des compartiments topoclimatiques.

Les variables édaphiques listées ci-dessus s'expliquent

très bien par la configuration générale des zones montagneuses atlasiques. Leur structure plissée, avec alternance d'anticlinaux et de synclinaux, et la nature même des roches confèrent à ces milieux d'altitude une topographie de pentes plus ou moins fortes. Ainsi par exemple, aux alternances de niveaux marneux et de bancs calcaireo-marneux sont associées des formes de reliefs assez molles, aux pentes assez faibles, avec de fortes tendances érosives (Photos 2 et 7) exacerbées par une faible possibilité d'infiltration, et se desséchant assez vite après les pluies. En revanche, les calcaires compacts, affleurant souvent en blocs massifs ou en lapiaz fissurés, relativement filtrants (Photo 10), donnent naissance à des reliefs vigoureux aux pentes fortes à raides (Photos 2, 3, 4, 5 et 6). Cette déclivité, quelle que soit son degré, favorise elle-même d'importantes accumulations qui ont donné lieu à des formations superficielles composées d'alluvions et/ou colluvions plus ou moins remaniés (Photo 9).

Outre ces substrats allochtones, le support végétal est le plus souvent constitué de substrats carbonatés (calcaires compacts ou en plaquettes, calcaires marneux, marnes) largement dominants au Moyen Atlas; ils le sont également dans la partie du Haut Atlas qui nous intéresse ici. De la même façon, les affleurements de roches magmatiques (granite, basaltes, gabbros...) sont communes aux deux chaînes où ils constituent les parties élevées du plateau d'Azrou au Moyen Atlas, mais restent localisés dans le Haut Atlas. Par endroits, on trouve des grès, des pélites ainsi que des conglomérats.

Quelle que soit la nature de la roche, le degré de fissuration est nettement prévalent sur les autres caractéristiques pour le développement des végétaux arborés. En effet, outre son rôle important pour l'implantation du système racinaire, il conditionne les réserves en eau du substrat selon que le substratum géologique est densément, largement et profondément fissuré (fissures remplies de terre fine), ou au contraire mai fissuré et compact (fissures étroites et raes). Par ailleurs, dans le cas des calcaires en plaquettes ou des marnes calcaires schisteux, le plan de schistosité (c'est à dire leur inclinaison) a également une grande influence: un plan de schistosité parallèle au sol est défavorable à la croissance des arbres car il empêche les racines de pénétrer, alors qu'un plan de schistosité à contresens est plus favorable (Photo 11).

D. Fragilité et santé de ces divers types de forêts d'altitude

Malgré leur homéostasie, la part d'occupation du sol des forêts d'altitude ne cesse de régresser en raison de la demande croissante en produits ligneux, en parcours et en terres de culture, induisant des pressions directes ou indirectes sur leur santé et altérant de fait leur résistance et leur résilience qui se manifestent d'une manière différente selon que les facteurs écologiques ont tendance à aggraver l'impact humain ou au contraire à en atténuer partiellement les effets. Cette situation prévaut dans une grande partie de ces forêts. De plus, l'intensité de ces perturbations dépend de la facilité avec laquelle peuvent s'exercer les pressions humaines parmi lesquelles s'inscrivent la proximité des «douars» (villages), des « azibs » (refuges d'alpage) et des sentiers de transhumance dont les zones limitrophes subissent généralement un fort impact. Dans un second

groupe se classent l'accessibilité pour l'exploitation et les possibilités offertes pour le transport du bois. Toutes ces conditions font que les écosystèmes forestiers de montagne sont inégalement touchés. Quoiqu'il en soit, sous ces diverses actions, le déboisement permanent, incontrôlé ou réglementé, est important. Ces effets cumulés peuvent se traduire par une régression rapide et on pourrait même craindre leur disparition totale.

Or, si les différents édifices forestiers évoqués ci-dessus sont chacun révélés par un biovolume très spécifique, montrant une efficacité maximale dans la production de la phytomasse, c'est-à-dire celle des feuilles, branches et troncs et racines, exprimée en matière sèche, ils ont la caractéristique commune de représenter un capital pastoral plus ou moins appréciable et une zone de pâturage privilégiée pour le cheptel où une partie appréciable de la couverture forestière est consommée (feuilles, branches, régénérations, jeunes pousses, rejets) dont il est bien difficile de ne pas envisager l'utilisation en haute montagne par exemple où les arbres constituent la seule ressource végétale disponible en permanence. En effet, la pauvreté et le manque d'opportunités économiques pour les populations riveraines en situation de survie ont conduit à la mise en place de pratiques de surexploitation qui prennent des proportions localement dramatiques lors des épisodes neigeux où les bergers pratiquent l'ébranchage pour servir de fourrage à leurs troupeaux lors des périodes de pénurie.

D'autre part, ces forêts d'altitude sont parcourues systématiquement par le troupeau engendrant souvent un pâturage excessif (importante charge en ovins et caprins, accrue en période de sécheresse) d'autant que le parcours y est libre et n'est limité que par la masse végétale disponible, alors que même les nombreux obstacles topographiques n'arrivent pas à dissuader les caprins. La plupart des essences forestières se trouvent ainsi éliminées puisque, d'une part, les arbres adultes sont récoltés et que, d'autre part, leurs semis sont inexistant; l'érosion rend souvent difficile leur installation et le troupeau les détruit pour ce nourrir. En effet, après avoir consommé la pousse, il arrache la touffe végétale entraînant ainsi la disparition de la végétation et provoquant des amorces localisées d'érosion. Cet état est d'autant plus préoccupant que le renouvellement de ces forêts, soumis généralement à des contraintes climatiques plus sévères et dont les sols plus fragiles, est plus lent.

Nous considérerons ici le cas le plus défavorable, celui des écotones infra- et supraforestiers évoqués précédemment où les écosystèmes arborés sont en équilibres instables, c'est-à-dire affectés d'une grande fragilité qui tient aux facteurs naturels eux-mêmes. Cette situation limite prévaut dans toute la région en dépit de la diversité phytologique entre massifs forestiers du fait que les processus écologiques entrant en jeu varient peu au sein d'un même massif, d'un massif à l'autre et d'une région à l'autre. Il en est ainsi par exemple sur le revers méridional du Moyen Atlas surplombant la plaine de Midelt où le cèdre de l'Atlas, en marge écologique, est menacé d'extinction pour des raisons climatiques (RHANEM, 2011). Un autre cas critique, précisément dans la région de Midelt, est constitué par une partie non négligeable des peuplements reliques de cèdre aux altitudes supérieures dans les écotones supraforestiers du Haut Atlas oriental de la région de Midelt qui voient leur surface diminuer au détriment des xérophytes épineux et qui, là où ils existent encore, ne sont plus représentés que par de vieux individus

agonisants, voire des cimetières de troncs morts dont la réhabilitation semble très délicate sans une intervention de l'homme. Elles ne subsistent que tant que les arbres encore en place ne seront pas détruits (Photo 8).

S'y adjoint à ces épisodes de sécheresse (RHANEM, 2011), l'impact encore plus intense du surpâturage pendant ces périodes qui a eu des répercussions très néfastes sur toute éventualité de régénération naturelle du cèdre. Il en résulte que la résilience (ARONSON & al., 1993) et la capacité d'adaptation de ces cédraies se trouvent ainsi très diminuées et sont par conséquent dans l'incapacité de se restaurer seuls. Aussi, serait-il plus judicieux de mettre au point des procédés de régénération artificielle, peu coûteux et surtout très fiables. Néanmoins, sans proscrire totalement le pâturage, une organisation pastorale peut-être envisageable par une articulation de l'espace montagnard en plusieurs secteurs. Dans ces conditions, un retour à l'équilibre pastoral par une répartition, maîtrisée et programmée dans le temps, de la charge sur les différents parcours favoriserait la régénération naturelle à condition de respecter la charge d'équilibre adaptée à chaque saison et à chaque étape de la croissance des jeunes arbres. Il est certain qu'une telle entreprise ne peut aboutir tant qu'une mise en défens concertée ne pourra être obtenue, car le pâturage s'avère inapproprié avec tout essai de reconstitution forestière. Cette concertation entre les gestionnaires chargés de ces forêts et les populations locales, en dépit des conflits, somme toute normaux et inévitables, devrait déboucher sur un certain nombre de règles de gestion librement acceptées et auxquelles tous les acteurs adhéreront totalement plutôt que d'essayer d'imposer brutalement une décision par l'intermédiaire de mesures réglementaires. En outre, une véritable participation des parties prenantes avec l'utilisation au maximum des compétences et de main d'œuvre locales ne peut qu'augmenter les chances de réussite. Ceci présente par ailleurs le double avantage de réduire les coûts et surtout, de favoriser grandement l'appropriation du projet d'aménagement par la population locale.

Mis à part le cas de ces limites forestières en marges



Photo 12 – Exploitation à 2200 m d'altitude d'une coupe en cédraie d'Imtchimène au débouché du vallon d'Imi-n-Takhamt dans le Haut Atlas de Midelt. Les vestiges de la présence de cèdre se réduisent aux souches d'abattage.

Scarifications dus au transport des grumes de cèdre, mais aussi scalpage, orniérage ou encore débardage et damage du sol dus à la pénétration et la circulation d'engins lourds (tracteur à chenilles, porteur) dans les parcelles sont autant de facteurs additionnels de perturbations temporaires qui affectent localement la structure superficielle du sol.

écologiques où les détériorations des habitats sont d'une acuité évidente, on peut admettre dans l'ensemble que la situation n'est pas encore théoriquement dramatique et que la quasi-totalité des essences présentent encore, dans leur milieu naturel et lorsque l'action anthropique n'est pas trop accusée, un aspect assez satisfaisant, voire localement bon, au moins pour celles qui se développent dans des conditions climatiques relativement favorables. Leur régénération, en dehors d'un pâturage excessif (qui représente toujours un très grave facteur de déséquilibre et de dégradation au second rang, après la mise en culture abusive), ne paraît pas poser de problème majeur. Il y a donc lieu d'être relativement optimiste compte tenu notamment des progrès enregistrés depuis quelques années dans la prise de conscience de la gravité du problème, en particulier dans ce qui reste des forêts.

Enfin, comme on vient de le voir tout au long des pages précédentes, en raison de leur grande extension géographique, les forêts d'altitude du Moyen et Haut Atlas peuvent présenter des situations très diverses. Cependant, elles présentent également des caractéristiques propres dont la conjonction peut induire un certain nombre de contraintes dans ces zones qui contribuent à perturber leur développement et équilibre:

- raccourcissement de la période de végétation avec l'augmentation de l'altitude, impliquant une croissance lente des arbres compensée par une très longue longévité;
- phénomènes de surmaturité physiologique ou de sénescence qui accompagnent ce phénomène ;
- parallèlement, plus on s'élève en altitude et plus la pente est forte contribuant à une plus grande fragilisation de ces forêts d'altitude;
- production de graines très insuffisante souvent stériles, à viabilité très réduite;
- rareté de la germination impliquant une résilience faible ou nulle de ces milieux très fragiles où leur retour à une situation d'équilibre y est lent, sinon impossible;
- la conjonction du broutage et du piétinement permanents accélère l'érosion et appauvrit le sol, d'autant plus que les pentes sont fortes ;
- existence de nombreux autres obstacles physiques (escarpements, falaises, blocs rocheux);
- accessibilité délicate pour l'exploitation (Photo 12) d'autant plus aggravée par l'éloignement des chantiers et coût des dessertes (pistes forestières), particulièrement élevé, à l'ouverture mais aussi à l'entretien, avec des impacts paysagers non négligeables;
- coût également prohibitif des travaux de restauration des peuplements d'altitude et des opérations de régénération des parcelles après exploitation;
- coupes délictuelles anarchiques et incontrôlées et affaiblissement des arbres par l'ébranchage, l'émondage et leur transformation en têtards ou encore en fûts colonnaires;
- le bois est utilisé directement par l'homme pour le chauffage ou les usages domestiques cuisson, beaucoup plus rarement pour la confection de charpentes de construction (par exemple poutres et traverses imputrescibles du genévrier thurifère, mais également de chêne vert à un degré moindre), et tout à fait exceptionnellement pour la menuiserie (principalement le cèdre);
- extraction, à partir de la distillation des branches de

résineux (surtout le cèdre, le genévrier thurifère et le genévrier oxycèdre), d'une sorte de goudron utilisée en médecine vétérinaire;

- exploitation du bois (bois d'œuvre, bois énergie et bois d'industrie), cueillette abusive et vente des menus produits de la forêt (plantes aromatiques, médicinales, pharmaceutiques et cosmétiques ; graines et fruits pour les animaux et les hommes ; bulbes et rhizomes ; feuillage ; boutons floraux et fleurs épanouies, lichens et bryophytes forestiers...), nécessaires au maintien des emplois locaux et donc de l'habitat rural ;
- défrichage et éradication des ligneux sur les pentes de versants à la recherche de nouveaux terrains de culture ;
- mécanisation des cultures par l'utilisation de la charrue multidisque et du tracteur par endroits;
- risques aussi de dépérissement des forêts d'altitude dus aux effets conjugués de la sécheresse, des gels hivernaux exceptionnels, des maladies cryptogamiques et des insectes ravageurs ;
- fréquentation touristique sans cesse accrue à la recherche de paysages, de nature et d'activités sportives et récréatives, avec toutes les obligations qu'elle impose, sont maintenant des facteurs importants d'une perturbation écologique permanente.

E. Éléments d'une méthodologie de cartographie topoclimatique

Contrairement à la plupart des variables écologiques (nature lithologique du substrat, altitude, pente...), le climat nécessite la mesure de paramètres sur une longue période dans des postes météorologiques fixes soigneusement répartis dans l'espace. Or, si à l'échelle régionale, les écosystèmes arborés se définissent relativement bien quantitativement par les principaux paramètres climatiques mesurés (pluviosité, température, rayonnement solaire et atmosphérique, vent et humidité), il en va autrement à l'échelle locale, particulièrement en montagne où les caractéristiques générales du climat régional sont plus ou moins modifiées par la topographie (THORNTHWAITE, 1954; GEIGER, 1965; GRACE, 1977; ROUGERIE, 1990; GEIGER & al., 2009; THILLET & SCHUELLER, 2009). À cette échelle, une analyse climatologique conventionnelle ne peut fournir que des indications partielles, largement insuffisantes, d'autant que les stations de mesure sont rares, voire totalement absentes, sur de vastes proportions du territoire, même dans les pays les mieux équipés à cet égard. En effet, les conditions climatiques locales en montagne ne sont pas liées seulement à la circulation générale de l'atmosphère, mais aussi aux différences de bilan énergétique à la surface du sol et aux mouvements de l'air dans les basses couches. Ces phénomènes, qui se produisent régulièrement chaque jour avec plus ou moins d'intensité, sont à l'origine des écarts thermiques (GUEYMARD, 1975; MAHRT, 1982 et 2006; WHITEMAN, 1990; BARRY, 1992; BÖNER & ANTONIĆ, 2009), ce qui influence l'évolution diurne et nocturne des écoulements d'air et les phénomènes de condensation liés aux inversions de température (DEFANT, 1951; WHITEMAN, 1990). Par ailleurs, ces processus radiatifs (transferts de chaleur sensible ou latente) jouent aussi un rôle essentiel dans l'émergence de contrastes topoclimatiques entre les versants en fonction de leur exposition vis-à-vis du rayonnement

solaire (insolation), qui présentent par conséquent des bilans radiatifs différents (HUFTY, 1986 et 2001).

D'autres variables comme la continentalité (IZARD & al., 1985) et la ventilation (FALLOT, 1992; CARREGA, 2008) interviennent aussi dans des proportions différentes et d'une manière inégalement contraignante selon les cas, pour définir et délimiter les compartiments topoclimatiques en multipliant notamment les écarts de température, de luminosité, et d'humidité.

Autant de nuances que de diversité dans les grandeurs et les combinaisons des facteurs climatiques dont la connaissance est précieuse car elles permet de faire les distinctions nécessaires et de fixer les limites des subdivisions topoclimatiques. Néanmoins, ces données sont difficiles à cerner en l'absence d'un réseau climatologique adéquat. Aussi, faute de pouvoir disposer suffisamment de données climatiques chiffrées pour la caractérisation de ces différents compartiments, leur désignation et leur délimitation passent-elles par la connaissance précise des lois qui président à ces phénomènes et par la mise en évidence d'éléments empiriques les matérialisant sur le terrain. Les indicateurs proposés et utilisés à cet égard sont suffisamment sensibles et permettent rapidement de représenter l'état des lieux et d'en détecter les variations. Il convient enfin d'indiquer que la mise en place des différents topoclimats et de leur répartition s'inscrivent totalement dans l'étude de la topoclimatologie.

Cependant, s'il est capital de déterminer sur le plan pratique les caractères distinctifs des compartiments topoclimatiques, il est non moins nécessaire que leurs différences soient scientifiquement précisées, afin de permettre des comparaisons rationnelles de territoires. Mais, avant d'aborder la méthodologie adoptée, il n'est pas inutile de consacrer quelques lignes au sens retenu dans ce travail pour la notion de topoclimatologie et l'intérêt qu'elle revêt pour la connaissance des conditions écologiques du milieu qui régissent le développement des arbres en montagne.

E.1. Approche et outils conceptuels opérationnels

D'un point de vue scientifique, la topoclimatologie a connu de nombreux développements. Sans vouloir être exhaustif, on peut en donner ici un aperçu. La relation entre les conditions topographiques d'un lieu et les phénomènes climatiques qui s'y déroulent n'a été scientifiquement étudiée et documentée qu'à partir du milieu du XX^{ème} siècle. Le terme «topoclimatologie» est alors proposé (THORNTHWAITE, 1954) pour décrire l'étude du climat d'un lieu. Les échanges de chaleur et d'humidité entre la surface du sol et l'air sont systématiquement étudiés pour différents types de surface (GEIGER, 1965; STULL, 1988). Des schémas généraux existent (GEIGER, 1965 et 1969; GEIGER & al., 2009; FLOHN, 1969; GUYOT, 1999; WHITEMAN, 2000), confortés, au cours de ces dernières décennies, par des modèles physiques dans plusieurs régions du globe, et qui ont été utilisées dans divers champs d'application (HESS, 1969; BARRY & VAN WIE, 1974; DOUGUÉDROIT, 1980; GEIGER, 1980; PAUL, 1980; RHANEM, 1985, 2008 a et b, 2009; 2010a et c; 2011 ; WHITEMAN & ALLWINE, 1985; CHOISNEL & SEGUIN, 1987; BAILEY, 1987 & 2009; CARREGA, 1994; CANTAT & COCHARD, 1998; CHOISNEL, 2001; ROE, 2005; BELTRANDO & al., 2008; LITTMANN, 2008; STENER, 2008).

Toutefois, si la topographie constitue l'un des critères

principaux d'identification (DOUGHÉDROIT, 1980 et 1987; ESCOUROU, 1981; CHOISNEL, 1984 et 1987; CHOISNEL & JACQ, 1987; PAUL, 1997), il n'en demeure pas moins que d'autres facteurs doivent être pris en considération dans la caractérisation du topoclimat, tels que le type de sol et le type de végétation, avec leurs conséquences indirectes, notamment sur les circulations latérales d'eau et sur les modifications du bilan énergétique et du bilan hydrique du sol. Il en résulte une marquerie de climats locaux où l'influence de la topographie, bien sûr primordiale, se combine avec les autres facteurs qui viennent d'être évoqués. Par conséquent, nous retiendrons comme définition de la topoclimatologie, l'ensemble des phénomènes qui se traduisent par divers types de changements climatiques à l'échelle locale.

Cette échelle de travail est particulièrement importante pour l'agronomie en particulier pour l'agriculture de montagne où les contrastes topoclimatiques se traduisent par des différences d'état et de croissance de la végétation (MACHATTIE & SCHNELLE, 1974). Par ailleurs, elle s'est avérée d'une grande utilité pour la cartographie phénologique (JEANNERET & RUTISHAUSER, 2010) et pour celle des propriétés du sol (BAILEY, 2009), mais aussi pour interpréter la distribution de la végétation spontanée (RHANEM, 2008 a et c, 2009, 2010 a et c, 2011; FRIDLEY, 2009).

E.2. Utilisation pratique de la notion de topoclimat

Cette notion, relativement récente, désigne l'une des échelles spatiales à laquelle est abordée du climat (CHOISNEL, 1984; GUYOT, 1999; PARCEVAUX DE & HUBER, 2007). Comme

son nom l'indique, le topoclimat d'un lieu est un climat local qui résulte de la modification du climat général sous l'influence de la topographie et plus généralement du relief : effets dynamiques sur l'écoulement de l'air, effets thermiques. Ces effets ont pour conséquence de générer des circulations locales de l'air : brises de montagne et brises de vallée (VERGEINER & DREISEITL, 1987; RAMPANELLI & al., 2004), inversions thermiques (WHITEMAN, 1986), ceintures thermiques (GEIGER, 1965; YOSHINO, 1984), effets de foehn et de venturi (PICARD, 1964; GERBIER, 1965; BOUET, 1973; BRINKMAN, 1971; CHAPPAZ, 1975; GRACE, 1977; Escourou, 1981; SMITH, 1989; GABERSEK & DURRAN, 2004).

La notion de topoclimat permet ainsi de prendre en compte la multiplicité des nuances et des contrastes climatiques entre secteurs contigus ou proches, de telle façon que sous un même climat général les différences entre les versants d'une même vallée ou d'un même massif montagneux soient mises en évidence. Ainsi un site aura une diversité d'autant plus grande de topoclimats que le relief sera plus accidenté et présentera des orientations variées par rapport à la dynamique orographique des flux porteurs d'humidité et/ou au rayonnement solaire.

En région montagneuse, les topoclimats se différencient sur des espaces relativement réduits, présentant des dimensions horizontales de l'ordre du kilomètre en moyenne (CHOISNEL, 1984; CHOISNEL & SEGIN, 1986; CARREGA, 1997). Dans certains cas, ces mensurations horizontales peuvent descendre à quelques centaines de mètres, notamment au niveau des cols et dans les gorges (RHANEM, 2008 b et 2011). En revanche, leur extension verticale varie entre 10 et 100 m (PAUL, 1997). Quoiqu'il en soit, un compartiment

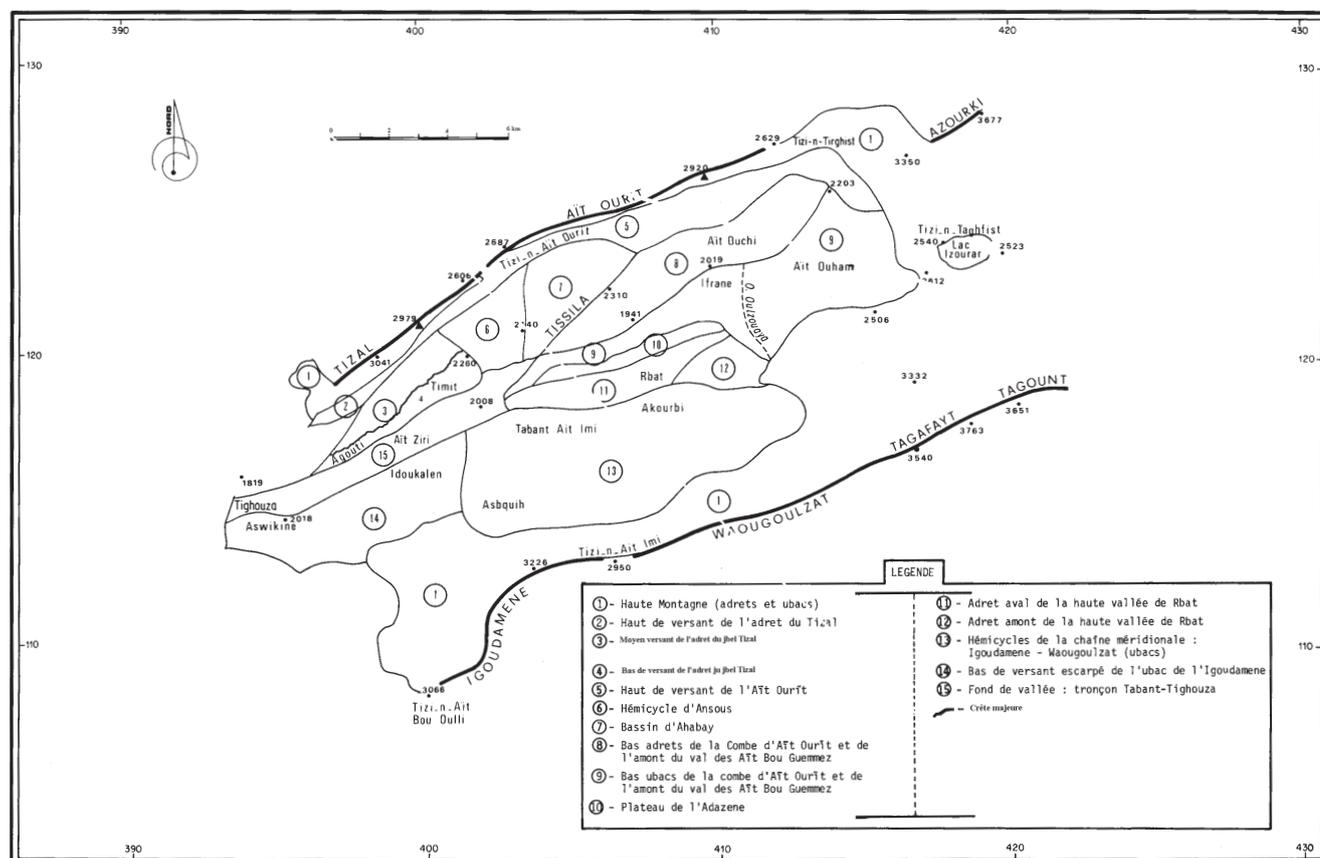


Figure 2 – Carte des compartiments topoclimatiques de la vallée des Ait-Bou-Guemmez dans le Haut Atlas (d'après RHANEM, 2008 b légèrement modifié).

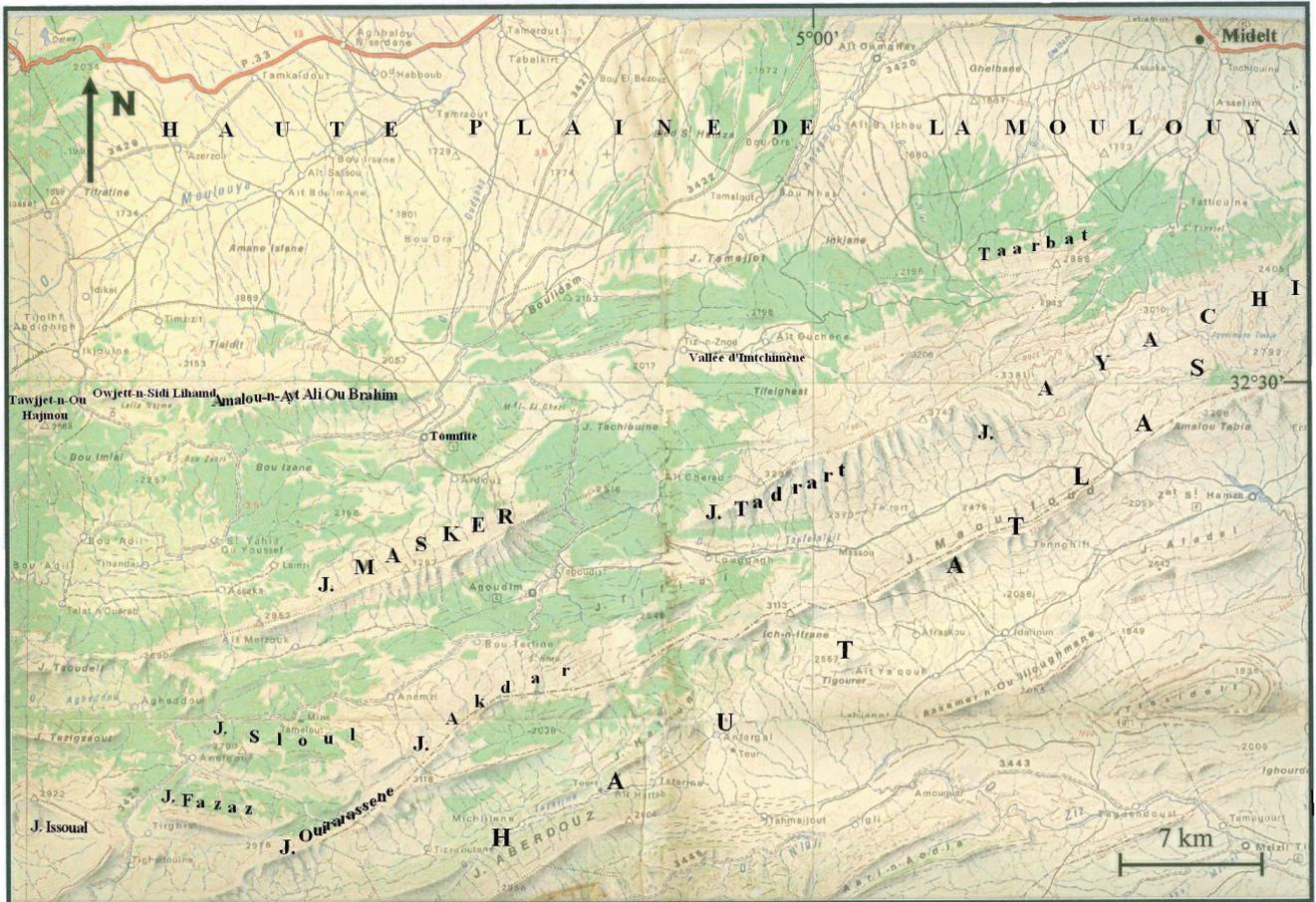


Fig. 3 – Limite sud-orientale de l’aire naturelle d’extension actuelle de *C. atlantica* au Maroc dans la partie occidentale de la région de Midelt au sud de la haute plaine de la Moulouya avec disposition des reliefs montagneux abritant les seuls peuplements spontanés du cèdre de toute la chaîne du Haut Atlas (RHANEM, 2010 b). Fond topographique extrait de la carte du Maroc au 1/250 000, feuille NI-30-13 KHENIFRA.

topoclimatique est, sur le terrain, la traduction originale d’une combinaison d’actions directes climatiques et topographiques exercées au même endroit, mais différentes les unes des autres dans leur chronologie et leurs modalités.

E.3. Découpage topoclimatique

Étant donné qu’il est impossible de multiplier à l’infini les stations de mesure, la connaissance directe des topoclimats est inévitablement déficiente. Cependant, un grand nombre



Photo 13 – Cédraie subhumide du jbel Owjjet -n- Sidi Lihamd (2763 m) dans le Haut Atlas de Midelt faisant partie de ce chapelet de cédraies privilégiées qui souligne d’ouest en est, sur presque toute la façade Haut-Atlasique ceinturant au sud la haute plaine de la Moulouya, le trajet des masses d’air océanique. Le cèdre y manifeste une grande aptitude à coloniser les lisières sur les talus de piste et les clairières par exemple. Vue d’ensemble prise près d village de Tikajjouine.



Photo 14 – Vue détaillée de la treeline supérieure de la cédraie océanique à *Cotoneaster nummularia* du jbel Tawjjet -n- Ou Hajmou qui prolonge vers l’ouest celle d’Owjjet -n- Sidi Liham. La limite supérieure du cèdre se cale sur la délimitation très tranchée entre deux entités géopédologiques marquée par le changement également brutal et observable du substrat (seuil phytogéomorphologique). Celui portant la cédraie est une colluvion terreuse, alors le groupement pulviniforme colonise une formation superficielle de blocs de grosseur variable plus ou moins emballés dans un matériau argileux brun.

d'informations peuvent être tirées de la seule analyse des cartes topographiques, parmi lesquelles l'on peut relever trois critères majeurs que sont l'altitude, l'inclinaison des pentes et l'exposition des versants. Ces derniers sont en effet d'une grande importance pour apprécier la température, l'insolation et la pluviosité locales à partir des connaissances météorologiques plus générales, et donc pour réaliser un découpage topoclimatique.

Par ailleurs, compte tenu des ordres de grandeur évoqués ci-dessus, ces contrastes topographiques et morphologiques peuvent donc être déceler à l'échelle du kilomètre et s'expriment par conséquent beaucoup plus clairement sur les cartes topographiques au 1/50 000^e. Celles-ci constituent le meilleur instrument pour le tracé des limites et des coupures climatiques, dans la mesure où elles permettent de suivre objectivement les bordures des principales unités morphologiques correspondant généralement aux lignes de ruptures de pente. Les topoclimats ainsi définis traduisent les différents seuils des deux facteurs limitants fondamentaux : les contraintes thermiques plus particulièrement celles liées au froid et les contraintes hydriques liées à la sécheresse auxquelles sont soumises les espèces arborées.

D'autres cartes thématiques peuvent fournir des éléments intéressants, et tout particulièrement celles portant sur la végétation et la géomorphologie (Rhanem, 2013). C'est cet ensemble d'éléments coordonnés entre eux qui permet de caractériser les différents types topoclimatiques. Ceux-ci doivent cependant être définis préférentiellement par des critères climatiques et topographiques. Dans le cas contraire,

ce sont les indicateurs biologiques et géomorphologiques qui doivent être utilisés. C'est de cette façon que nous avons inventorié et dessiné la carte topoclimatique de la vallée des Aït-Bou-Guemmez (Fig. 2).

III. CRITÈRES ET INDICATEURS ET EXEMPLES D'UTILISATION

A. La circulation des masses d'air et exposition par rapport au vent humide

Pour bien comprendre et délimiter les compartiments topoclimatiques dans les montagnes du moyen et Haut Atlas, la prise en compte de l'évolution et de la circulation des masses d'air est absolument nécessaire, et s'avère d'une grande utilité. En effet, si l'origine prédominante des flux pluvio-gènes est un élément majeur de différenciation du climat régional, elle intervient aussi, parfois de façon pertinente, dans l'individualisation et l'organisation des topoclimats de certains sites montagneux. Les effets en découlant distribuent différemment essences et espèces végétales forestières. L'exemple des cédraines du Haut Atlas oriental surplombant au sud la haute plaine de la Moulouya est très démonstratif à cet égard (Fig. 3). Ce sont en effet des conditions topoclimatiques très singulières, liées à un environnement topographique particulier, qui permettent à ces formations de prospérer en dépit d'une situation géographique paradoxale qui rend *a priori* leur existence impossible ou tout au moins inattendue (Photos 13 et 14).

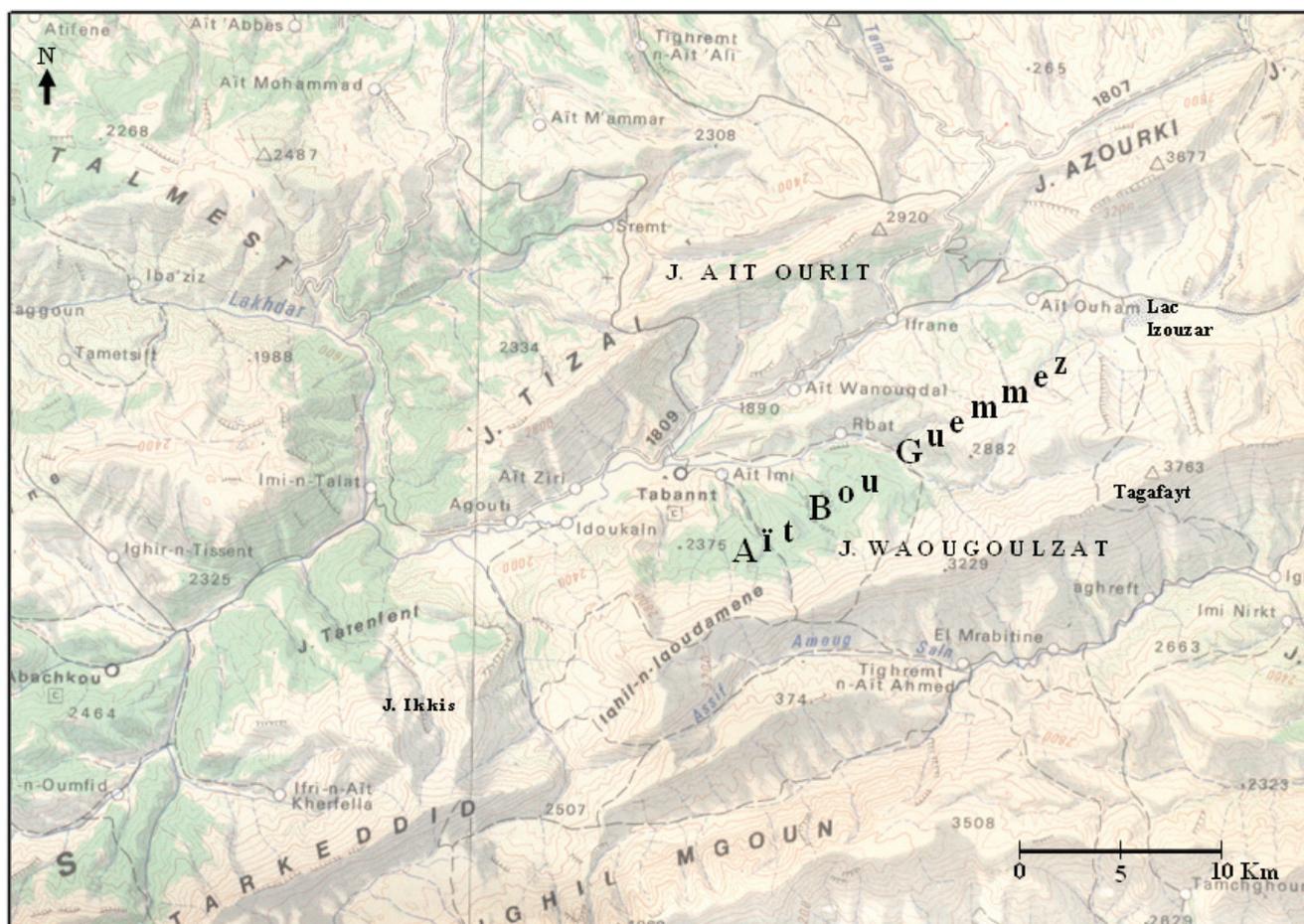


Fig. 4 – Toponymie et agencement des principaux chaînons de la vallée des Aït-Bou-Guemmez et de ses alentours avec l'indication de l'altitude de leur point culminant. Extrait de la carte du Maroc au 1/250 000, feuille NH-29-4 DEMNATE.

Tableau 1 – Caractéristiques pluvio-thermiques des topoclimats de l’adret du jbel Tizal dans la vallée des Aït-Bou-Guemmez (Haut Atlas), calculées à partir des paramètres relevés dans le mini-poste de Tabant (d’après Rhanem, 2010 a, légèrement modifié).

Nature du topoclimat	Tranche altitudinale et altitude moyenne (m)	m (en°C)	T. max. (en°C)	T. min. (en°C)	T. moy. (en°)	P (mm)
Fond de vallée	(1700-1900) 1800	-1.3	20.2	4.6	12.4	400
Bas versant	(1901-2300) 2100	-3.0	18.5	2.9	10.7	520
Moyen versant	(2301-2700) 2500	-5.2	16.3	0.7	8.5	640
Haut versant	(2701-3100) 2900	-7.4	14.1	-1.5	6,3	760

Tableau 2 – Caractéristiques pluvio-thermiques des topoclimats du flanc septentrional de la cuvette d’Azrou (Moyen Atlas) calculées à partir des données de la station d’Azrou.

Type topoclimatique	Altitude (m)	m. (en°C)	T. max. (en°C)	T. min. (en°C)	T. moy. (en°C)	P (mm)
Fond de cuvette	1250	2,4	21,11	9,45	15,28	850
Bas de versant	1350	1,95	11,66	9,0	14,83	880
Ensellement	1550	1,05	19,76	8,10	13,93	950
Sommet de l’escarpement	1850	-0,3	18,41	6,75	12,58	1000

Gradient thermique de l’adiabatique sèche : 0,55°C/100m. Gradient thermique de l’adiabatique humide : 0,45°C/100m. **m**: moyenne des minima du mois le plus froid. **T max.** : Température maximale moyenne annuelle. **T min.**: Température minimale moyenne annuelle. **T moy.** : Température moyenne annuelle. **P**: Précipitations.

Bien qu’étant moins exposées directement aux vents humides, ces cédraies, presque exclusivement cantonnées aux versants septentrionaux des chaînons du Haut Atlas de la région de Midelt, sont dans une situation topoclimatique aussi favorable que celle des cédraies océaniques de la périphérie du Moyen Atlas mentionnées en introduction (Photo 1). Leur fréquence décroît cependant d’ouest en est. Une telle différenciation dans la distribution du cèdre découle principalement des incidences climatiques engendrées par l’orientation des reliefs environnants vis-à-vis du vent pluvieux dominant qui est ici de nouveau mise en jeu et de la manière suivante. La haute plaine de la Moulouya de direction ouest-est et les versants atlasiques l’encadrant, sont en période hivernale plus ou moins rapidement atteints par les masses d’air froid venues du NW (effet de canalisation, d’engouffrement dans le couloir formé au NE du bassin d’Arhbalou entre le Tizi -n- Tanout Ou Filal et les premiers chaînons du Moyen Atlas central plissé). Ces dernières, acheminées massivement, s’étalent progressivement sur les reliefs montagneux de part et d’autre du fond de vallée de la Moulouya. En s’infléchissant vers le bas le long de cet axe, elles voient cependant leur vitesse diminuer, se réchauffent par compression et se dessèchent tant soit peu. Par temps moyennement perturbé, on peut observer que le ciel s’éclaircit très vite dès la retombée du plateau supérieur du Moyen Atlas méridional sur la plaine. En revanche, l’afflux d’air provoqué par le ralentissement de la vitesse du vent au franchissement de cet obstacle accentue l’ascendance de l’air lorsque celui-ci aborde les versants atlasiques ceinturant au nord et au sud la

plaine de la Moulouya, et par suite favorise l’intensification des précipitations qui tombent principalement sous forme neigeuse (condensation par ascendance orographique en régime dépressionnaire). Il en est ainsi dans le Haut Atlas (Fig. 3), où le débordement des nuages est tel qu’il recouvre progressivement l’ensemble des deux lignes de reliefs disposés *grosso modo* W-E : la première étant la plus modérée, est constituée par les jBELS Tawjjet -n- Ou Hajmou (2654 m), Owjjet -n- Sidi Lihamd et Amalou -n- Ayt Ali Ou Brahim (2646 m), alors que la deuxième, constituée par les jBELS Maasker et Ayachi, légèrement en retrait du côté sud, forme l’ossature principale de la chaîne dans cette région. Entre leurs bordures, s’interpose une zone constituée de dépressions, séparées de petits chaînons suivant l’axe de la chaîne. Cependant, à mesure que l’on s’éloigne du pôle le plus humide, et que la plaine s’abaisse et s’élargit en éventail vers le NE, les vents humides diminuent d’intensité et s’assèchent progressivement en étant davantage allégés de leur vapeur d’eau. Aussi les nuages arrivent-ils affaiblis sur l’extrémité orientale du massif de l’Ayachi. Cela est parfaitement visualisé par le décalage régulier en altitude de la limite inférieure des neiges en raison des effets cumulés du gradient horizontal de continentalité ouest-est parallèlement à la rive droite de la haute vallée de la Moulouya et du gradient thermique altitudinal perpendiculaire aux versants. Il en résulte une obliquité des isoplètes par rapport à cette ligne de plus grande pente et un étirement en fuseau de la bande neigeuse (RHANEM, 2009).

Une des conséquences pratiques directes est qu’à altitude égale l’épaisseur de la neige est supérieure sur l’ubac du



Photo 15 – Vue sur l’adret du Tizal (3040 m) dans la vallée des Aït-Bou-Guemmez (Haut Atlas). Au topoclimat escarpé du haut versant très venté du à l’effet venturi associé à un ennuagement dressant une sorte de mur que l’on appelle mur de foehn, s’oppose celui de la plaine alluviale. À la verticale de celle-ci, l’air fortement réchauffé, monte comme dans une cheminée provoquant un assèchement maximal de l’atmosphère en sorte que ce topoclimat de fond de vallée est caractérisé par une intense luminosité, une forte insolation, une faible humidité de l’air et des vents tourbillonnaires. Entre ces deux extrêmes, s’intercalent ceux du bas-versant colluvionnaire et du mi-versant fortement raviné, et dont la différenciation est due principalement aux formes du relief qui déterminent aussi l’inclinaison des pentes. Les ruptures de pente, que l’on peut deviner sur le cliché, indiquent leurs limites respectives.

chaînon susmentionné que celle observée par exemple sur la même exposition du massif de l’Ayachi à l’aplomb de la ville de Midelt. Malgré qu’il soit plus le plus haut de la région, il n’en constitue pas moins, parmi l’ensemble des reliefs surplombants du côté sud la haute plaine de la Moulouya, le pôle le plus sec. Il s’en suit une diminution de l’amplitude altitudinale de la cédraie à mesure que l’on s’éloigne des zones occidentales favorables au cèdre jusqu’à ce que ses limites inférieure et supérieure finissent par se confondre vers 2300 m aux alentours du cirque de Jaafar (Photos 3 et 6). Autrement dit, ces conditions climatiques de faciès océanique dégradé définissent la limite orientale absolue du cèdre dans toute l’aire de sa distribution naturelle actuelle dans le Haut Atlas. Cependant, ici ou là, dans les chaos rocheux du massif de l’Ayachi, à la faveur de microhabitat ou par meilleure adaptation individuelle, des sujets de cèdre se sont maintenus.

Comme cela vient d’être mis en évidence sur ce rebord de la plaine, le même phénomène s’observe aussi sur la retombée méridionale du Moyen Atlas limitant au nord la haute plaine de la Moulouya (RHANEM, 2011).

A.1. Effet de foehn

Plus globalement, l’on observe que la sensibilité de ces montagnes s’exprime généralement, à chaque fois que l’orientation de la chaîne le permet, par une opposition mésoclimatique entre les versants exposés au vent porteur de pluie où, parallèlement au refroidissement des masses d’air suivant le gradient thermique de l’adiabatique humide, l’intensité des condensations et des précipitations est renforcée, et ceux qui en sont abrités. Ces derniers, moins arrosés, subissent assez souvent un régime de foehn. Ce



Photo 16 – Cuvette de l’Aguelmame Sidi-Ali dans le Moyen Atlas. Le cèdre de l’Atlas, moins tolérant aux longues périodes de gel consécutives aux inversions thermiques, occupe des altitudes supérieures plus clémentes alors que le thurifère, qui supporte le mieux le froid est relégué au bas de versant.

contraste est d’autant plus marqué que le relief est plus vigoureux et qu’il est orienté perpendiculairement à la circulation comme c’est le cas par exemple de la vallée des Aït-Bou-Guemmez (Fig. 4). En effet, ce phénomène y prend une grande ampleur en raison aussi d’un fort dénivelé qui dépasse 1200 m sur l’adret du Tizal (Photo 15) de sorte qu’après son passage au dessus de cette imposante barrière, l’air redescend d’autant plus rapidement que les pentes sont raides provoquant un réchauffement et assèchement intense suivant le gradient thermique de l’adiabatique sèche. D’une manière générale, à la montée, l’air saturé ne perd qu’un degré tous les 200 m mais à la descente, l’air non saturé gagne un degré tous les 100 m. Autrement dit, l’air se réchauffe plus vite à la descente qu’il ne s’était refroidi à la montée. Par ailleurs, en retombant, les flux d’air se décollent par rapport aux pentes entraînant l’apparition de rotors, comme le montrent KUETTNER, 1959; LESTER, 1993 et 2007; DOYLE & DURRAN, 2004; HERTENSTEIN & KUETTNER, 2005.

L’effet de foehn ainsi crée, qui est souvent visible par temps moyennement perturbé en regardant les nuages formant un mur par-dessus la ligne de crête de ces massifs (Photo 15) et qui se reproduit assez fréquemment, est la raison principale qui justifie notre proposition de placer la limite inférieure du compartiment topoclimatique de haut-versant juste au dessous du voile nuageux parallèlement à celle de la ligne de rupture de pente, conforté en cela par le fait que cette unité géomorphique est aussi modelée par les processus morphogénétiques de désagrégation mécanique (roche gélive avec nombreuses alternances gel-dégel). De plus, ses pentes raides entraînent un ruissellement, diffus ou peu concentré, superficiel ou souterrain, assez prononcé ; il en résulte, d’une part une perte d’eau qui augmente son aridité, et, d’autre part, une perte d’éléments fins qui produit une diminution de la capacité de rétention des bancs de calcaires compactes. En fait, ces derniers, à pendage inverse, forment des ressauts, vires et anfractuosités qui constituent autant de pièges à neige. En outre, ils sont localement séparés par de larges fissures remplies de terre fine, où la capacité de rétention est suffisante pour que le chêne vert croisse. L’eau de fonte nivale et l’apport non négligeable des précipitations occultes engendrées par un ennuagement régulier et relativement fréquent lui assurent un complément

appréciable pour le bilan hydrique total, et compensent ainsi, en grande partie, l'aridité édaphique.

D'autre part, plus mal approvisionnées en eau, plus vite desséchées, les pentes de mi-versant, même si elles sont moins fortes, sont bien plus sèches que ne le sont celles du haut-versant soumises au même mésoclimat général d'adret. En effet, la portion médiane du Tizal est un talus structural constitué dans le détail de plusieurs affleurements calcaréo-dolomitiques étroits et très peu fissurés, déterminants des figures de dissection sous forme d'une file de chevrons et de dièdres. Cette unité géomorphique résulte en partie d'un système morphogénétique d'accumulation, où ont agi concurremment des processus dus à la gravité, au ruissellement et au ravinement (éboulisation, reptation, décapage superficiel). Ses limites inférieure et supérieure correspondent par ailleurs à celles du deuxième topoclimat. La relative faiblesse des précipitations (Tab. 1) et l'absence de fissuration créent un milieu où le bilan hydrique est insuffisant à l'installation de l'yeuse, mais qui, en revanche, est propice au développement de quelques petites espèces chaméphytiques plus xérophiles dominées par *Ormenis scariosa* Lit. et Maire en compagnie de *Genista scorpius* (L.) Lmk.

Par ailleurs, dans cette seconde unité géomorphique, suite à la torrentialité des ravins, il s'est construit à leur débouché des cônes de déjection disposés en chapelet et fossilisés par une croûte où les formes de terrain résultent essentiellement de processus de décapage et de ravinement. Dans ce troisième topoclimat de bas-versant, même si les précipitations peuvent apparaître relativement importantes (Tab. 1), l'aridité édaphique de ce substrat encroûté et très caillouteux à faible capacité de rétention d'eau est telle qu'elle ne permet plus que le développement de chaméphytes encore plus petites comme l'armoise blanche. Autrement dit, les différences édaphiques sont aussi importantes que les différences topoclimatiques observables au niveau de l'ensemble de cet adret.

On observe enfin un quatrième topoclimat de fond de vallée essentiellement constitué par les basses terrasses engendrées par sapement puis accumulation alluviale (Photo 15). Toutefois, contrairement aux autres topoclimats, la présence de sols profonds et fertiles ont donné lieu à d'importantes cultures irriguées aux dépens de la végétation naturelle.

A.2. Effet Venturi

En plus de l'effet de foehn analysé précédemment, l'autre conséquence majeure de l'ascendance forcée de l'air le long de la pente d'un versant est l'accroissement de la vitesse du vent dans les parties sommitales des massifs montagneux en raison de l'effet venturi. En effet, les masses d'air devant passer par-dessus les reliefs (si elles ne peuvent pas les contourner), sont contraintes d'infléchir leur trajectoire vers le haut ; il s'en suit un rétrécissement de la zone de circulation à mesure que l'on s'approche du sommet. La section d'écoulement de l'air étant moindre, les particules d'air se retrouvent accélérées, de manière à maintenir leur débit initial.

La prise en compte de ce critère permet ainsi d'apporter d'autres éléments de précision pour la caractérisation des topoclimats et d'appréhender aussi les conséquences directes

ou indirectes de certains de ses impacts. Par exemple en haute montagne (Photos 3, 4, 5 et 8) la vitesse du vent est en permanence très importante, elle contribue avec le froid (*cf. infra*) à l'arrêt de croissance des arbres et on atteint alors la limite supérieure des formations arborées, comme le montrent par exemple pour d'autres régions du globe ; YOSHINO, 1973; ou encore HOLTMEIER & BROLL (2010); mais l'action des vents violents peut aussi intervenir en tant qu'agents morphogènes de la structure de la végétation (NORTON & SCHÖNENBERGER, 1984; HOLTMEIER, 2009).

B. Le froid

Certes, le relief agit de façon déterminante dans l'individualisation des topoclimats par des mécanismes liés notamment à l'exposition des versants, à l'effet de blocage qu'exercent les fronts montagneux sur les masses d'air humides et d'une manière générale par tous les facteurs liés à la topographie. Néanmoins, le gradient climatique altitudinal reste le fait prédominant en raison des dénivellations qui introduisent un effet d'altitude provoquant des différences climatiques d'un point à un autre d'autant plus fortes que leur ampleur est importante sur une faible distance (PÉGUY, 1969). Toutefois, si l'altitude en elle-même n'a aucune action propre, elle traduit cependant une réaction à la raréfaction progressive de la pression atmosphérique conjointe à une diminution de la température et une augmentation des précipitations (KÖRNER, 2007, KÖRNER & PAULSEN, 2004). De plus, la combinaison de ces deux mécanismes détermine l'existence d'un manteau neigeux, lui-même croissant avec l'altitude, dont le rôle comme réserve d'eau est capital. Leur conjugaison aboutit à une véritable mosaïque de conditions topoclimatiques différentes du bas au sommet des versants dont l'intensité varie selon l'encaissement des divers chaînons, et entre les divers versants. Mais, c'est surtout la diminution de la température qui est, du point de vue écologique, le fait le plus net et le plus important. Les gradients thermiques qui en résultent permettent en effet le franchissement de seuils physiologiques, si bien que la végétation forestière souligne par des paliers successifs la dégradation du climat. En effet le trait capital qui unit toutes les forêts d'altitude est le froid plus ou moins intense et plus ou moins persistant Il constitue de fait l'élément climatique le plus sensible dont les effets, directs ou indirects, sont les plus décisifs.

Ainsi par exemple, les risques de froid peuvent selon les cas entraîner la mort immédiate d'une partie ou de la totalité d'un arbre. Ils se situent surtout dans les phases critiques que sont la germination et l'installation de jeunes peuplements, mais aussi lors des différentes phases d'activité de leur développement phénologique (débourrement, croissance, floraison, fructification), et tout particulièrement au moment du débourrement qui constitue la phase de plus grande sensibilité. Les gelées tardives constituent à ce titre un grave handicap pour la croissance des jeunes plants, encore fragiles, installés naturellement ou artificiellement par les reboiseurs dans des positions topographiques à risque. Or, si leur survenue peut sembler normale en limite supraforsitière, il n'en est pas de même en lisières inférieures des forêts de cuvettes fermées, de vallées étroites et de cols qui peuvent être le siège d'inversions thermiques répétées. Celles-ci sont la conséquence de l'accumulation et de la stagnation

d'air froid et de brouillards pendant les périodes de temps anticyclonique, clair et non venté, survenant après les chutes de neige hivernales ou printanières. Le fond est alors plus froid sous les masses de brouillards que les pentes supérieures qui émergent.

Cette inversion du gradient altitudinal de température atteint parfois des valeurs exceptionnelles. Ainsi, pour les températures minimales journalières, PUJOS, 1966, a-t-il relevé plus de 10 °C d'écart pendant plus d'une semaine, sur une dénivellation de moins de 200 m entre le sommet et le fond du cratère de Michlifèn, à une dizaine de kilomètres au sud-ouest de la ville d'Ifrane, dans le Moyen Atlas Marocain.

Il convient de remarquer que ce dernier caractère climatique est non seulement corroboré par la présence de lacs d'air froid que l'on observe assez fréquemment dans les dépressions au lever du jour en hiver et au printemps par temps clair, mais aussi par la végétation dont les caractères en traduisent les effets. Ces creux à gel couvrent parfois des surfaces considérables sur les grands plateaux du caucase Moyen Atlasique, quand ils ne sont pas réduits à des dolines ou des poljés (PUJOS, 1966; PEYRE, 1978). En revanche, dans le Moyen Atlas plissé, un tel phénomène est beaucoup moins répandu. Il en est ainsi sur les massifs étudiés où nous n'avons pu observer l'exemple fourni par la cuvette d'Aguelmame Sidi-Ali (Photo 16) au sud-est d'Ifrane (Fig. 1). Sur le haut des versants, vers 2200-2300 m d'altitude, un niveau de cédraie à *Helianthemum croceum* relativement thermophile, colonise des sols rendziniiformes superficiels. Plus bas, une thuriféraie à *Juniperus thurifera*, sur du matériel terro-pierro-rocheux est accompagné de divers nanophanérophytes: *Berberis hispanica* et *Ribes atlantica*. En dessous de 2150 m, les pieds de genévrier thurifère se raréfient très rapidement pour finalement disparaître vers 2100 m, de sorte que l'étage inférieur en est dépourvu (Photo 16). Toutefois, sur les fonds et bas de pente rocailloux à bancs calcaires ou conglomérats encroûtés, s'établissent des essences caducifoliées rabougries et buissonnantes, plus rustiques, telles l'aubépine (*Crataegus lacinata*) et le frêne dimorphe (*Fraxinus dimorpha*). Cependant, ces dernières nanophanérophytes ne subsistent plus au col du Zad (2178 m), à une dizaine de kilomètres au sud de l'Aguelmame Sidi-Ali. C'est notamment la violence du vent, par effet Venturi, qui empêche leur installation. Outre les espèces constitutives du paysage de haute montagne qui viennent d'être citées, on trouve tout particulièrement une autre petite hémicryptophyte, plaquée contre la surface du sol : *Scorzonera pygmaea* S. et Sm. (Scorsonère pygmée).

Des faits comparables se produisent assez fréquemment dans le Moyen Atlas, notamment dans la dépression de Michlifène au sud-est d'Ifrane (Fig. 1) où les régénérations de lisière à cèdre de l'Atlas qui commençaient à progresser vers le bas des pentes, il y'a quelques décennies, ont été détruites. Celles qui ont survécu à ces périodes de gel fatales, connaissent à ce jour des problèmes de nanisme très marqué.

La prise en compte de tels phénomènes doit inciter les forestiers reboiseurs à plus de précautions. Certes, dans l'état actuel, l'appréhension de ce processus sur le terrain reste difficile à cerner, *a fortiori* de le mettre en équation, mais parfaitement révélé par la végétation. Un examen attentif de celle-ci est riche d'enseignements et aurait pu ainsi éviter de tels échecs. En effet, naturellement dépourvu de cèdre, le fond et le piémont sont plutôt recouverts de graminées pérennes en mélange à des xérophytes

épineux. Le froid, en combinaison avec des températures anormalement basses, et un bilan hydrique excédentaire du sol (hydromorphie) sont les principaux facteurs décisifs pour ce climax édapho-topoclimatique. Rappelons enfin que ces paysages asylvatiques caractérisent habituellement les milieux supraforestiers où le froid excessif et la violence du vent concourent à leur individualisation et à l'élimination des arbres.

D'autre part, le gradient thermique invoqué ci-dessus est à l'image de celui qu'éprouve la répartition latitudinale du cèdre de l'Atlas au Maroc évoqué en introduction. Celui-ci est cependant mille fois plus faible que le gradient altitudinal observé en montagne: en moyenne 0.5 à 0.65 °C pour 100 m (COLWELL & al., 2008) de sorte que chaque espèce arborée ne se développe plus que sur de courtes distances entre les altitudes extrêmes qui correspondent aux limites climatiques compatibles avec sa physiologie (GRABHERR & al., 1994; OZENDA, 2002). Le cas des paysages asylvatiques de la haute montagne marocaine contrastant avec ceux des étages arborescents d'en dessous, est à ce titre très évocateur du point de vue physiologique. Aux marges de leur écotone (HANSEN & al., 1988; VAN DER MAAREL, 1990; SLATYER & NOBLE, 1992; GOSZ, 1993; RISSER, 1995; HUFKENS & al., 2009; FARINA, 2010), l'accentuation des contraintes thermiques, consécutive à l'augmentation de l'altitude, entraîne la disparition des arbres au-delà de la zone d'épreuve (FLAHAUT, 1901 a et b; ARNO & HAMMERLY, 1985; ARQUILLIERE, 1986; DIDIER L. F., 1998; HOLTMEIER, 2009); à ce niveau, déjà affaibli, l'arbre ne lutte plus que pour sa survie il n'arrive plus à produire de la lignine indispensable à sa croissance par suite du raccourcissement excessif de la saison de végétation (FRITTS, 1976; BARNES & al., 1998) pour des raisons, là aussi, écophysologiques (LENZ, 1967; TRANQUILLINI, 1979; SLATYER & NOBLE, 1992).

Par exemple, sur les chaînons du Haut Atlas de la région de Midel (Fig. 3), surplombant la maison forestière de Mitkane (Photo 3), l'écotone arboré de la treeline supérieure formé par le cèdre de l'Atlas s'identifie avec la limite inférieure des neiges printanières de sorte que le topoclimat de haute montagne est affecté par la maintenance au sol de la neige pendant des périodes hivernales plus ou moins continues prolongées parfois tardivement au printemps. Un tel enneigement est néfaste pour les jeunes plantules de cèdre, si par chance elles arrivent à se soustraire à la dent de la chèvre, autant par son épaisseur que par le fait qu'il est localement à l'origine du déclenchement des processus cryo-niveaux lors des phases de fusion. Ces derniers pouvant occasionner la déshydratation des cellules des plantules de cèdre rescapées.

En fait, il ne s'agit pas de limite linéaire rigide mais plutôt d'une bande dans laquelle cette *treeline* dessine une ligne sinueuse aux altitudes comprises entre 2600 à 2700 m qui reflète nettement des influences géomorphologiques. Elle est incisée vers le bas à chaque abrupt et grande échancrure dus qui entrecouperont le haut de versant. Les éboulements qui s'y produisent, bloquent la recolonisation du cèdre en fonds de ravins et de vallons et sa remontée; par contre, celle-ci est maintenue en bordure sur les pentes (RHANEM, 2010 b).

Néanmoins certaines limites climatiques sont franches et sont d'autant plus marquées que la rupture de pente a été grande ; c'est le cas notamment des piémonts de Tattiwine et d'Aït-Oufella formant respectivement la transition entre la plaine de Midelt et les contreforts périphériques du

Haut Atlas vers le sud et ceux du Moyen Atlas vers le nord (Fig. 1). Ces passages du piémont au versant s'identifient en effet avec l'altitude inférieure des neiges hivernales et se confondent à des écotones infraforestiers composés de plantes xérophiles (RHANEM, 2009 et 2011). Ici la treeline inférieure formée par le chêne vert résulte pour l'essentiel du déficit hydrique qui s'accroît au fur et à mesure que l'on descend vers la plaine aride de Midelt.

C. Effet de versant

La déclivité et l'exposition des pentes au rayonnement solaire ont un très grand effet sur les conditions climatiques à leur voisinage, et constituent les deux principaux facteurs discriminants des divers topoclimats de montagne. Toutefois, la variable «exposition» est elle pour laquelle les contrastes sont les plus facilement explicables. Ainsi que le montre par exemple la figure 5, l'adret bénéficie d'une insolation plus forte, et donc de plus de chaleur, que l'ubac. Ce dernier est presque à l'ombre; l'énergie reçue est, par conséquent, bien différente.

Par ailleurs, le versant septentrional reçoit de plein fouet les perturbations océaniques, alors que l'adret en est abrité. En conséquence, les deux couples de facteurs déterminants agissent en synergie, ce qui accentue encore le contraste (avers: exposition fraîche faisant front aux flux humides ; envers : exposition thermophile et position d'abri par rapport aux vents humides) révélé par des différences floristiques importantes.

Des contrastes du même ordre peuvent être observés dans le Moyen Atlas selon que le versant est exposé à l'est ou à l'ouest. En effet, dans les vallées qui échancrent son revers méridional, les pentes exposées à l'est captent les rayons solaires le matin, alors qu'il fait frais et que le degré hygrométrique de l'air est élevé : l'ablation par sublimation y est, par conséquent, réduite. Sur les pentes orientées à l'ouest, au contraire, les rayons solaires frappent la surface neigeuse au cours de l'après-midi, au moment du maximum thermique, ce qui provoque une forte sublimation. Enfin, le versant occidental des vallées est susceptible de bénéficier d'une suralimentation neigeuse, du fait de la déflation de la neige tombée sur le versant ouest de l'interfluve

correspondant. En définitive, les pentes exposées à l'ouest se trouvent très tôt déneigées, alors que celles exposées à l'est bénéficient d'un tapis neigeux épais qui se conserve plus longtemps dont la fonte plus ou moins tardive contribue, plus durablement, au maintien de l'humidité du sol (RHANEM, 2011).

IV- QUELQUES PERSPECTIVES SUR L'ORIENTATION DE LA GESTION

Une des premières valorisations possibles de cette méthode de typologie, en dehors de son aspect fondamental, est sans doute son utilisation dans le cadre des aménagements forestiers des forêts soumises au régime forestier. À ce titre, il faut convenir qu'il existe déjà dans ce domaine d'innombrables projets et programmes d'aménagement des ressources naturelles dans les forêts d'altitude du Moyen et Haut Atlas à un degré moindre, à l'occasion desquels certaines priorités vont à la régénération des forêts ou à la création de zones boisées nouvelles. Presque toujours dans ce genre d'opérations des mécomptes surviennent, parce que toutes les limitations et contraintes d'ordre écologique n'ont pas été suffisamment analysées d'avance, puis respectées. La réussite de telles entreprises ne peut résulter que de la maîtrise globale des facteurs qui interfèrent pour constituer le milieu naturel.

Ainsi par exemple, très souvent les approches développées pour l'étude des climats au Moyen Atlas central négligeaient sa dimension temporelle et fournissaient une image trop statique d'une réalité en fait très mouvante dans le temps et étonnement diversifiée. Il en est ainsi sur la route nationale 13 entre Azrou et Midelt où seule une analyse plus précise *in situ* des données topoclimatiques et édaphiques du milieu à différentes échelles temporelles pouvait laisser entrevoir les causes écologiques de l'absence d'arbres sur le plateau d'Azrou ainsi que dans la plaine du Guigou (Photos 17 et 18) où pourtant les altitudes ne sont pas incompatibles avec leur développement. En effet, s'inscrivant dans une région climatique à vocation forestière, on pouvait penser en première approche qu'il s'agissait d'une dégradation d'origine anthropozoïque. Sans doute celle-ci n'est pas négligeable dans cette région constituant traditionnellement des pâturages d'estive très fréquentés. Soulignons à ce sujet



Photo 17 – Plateau basaltique d'Azrou (1900 m) et plaine du Guigou dans Moyen Atlas tabulaire. L'asylvatisme impose son empreinte au paysage végétal de ces deux entités topoclimatiques. Vue à partir du sommet du jbel Hebri (2103 m).



Photo 18 – Sur le plateau d'Azrou, les forêts sont strictement localisées aux pentes des trois édifices volcaniques: la caldeira Lechmine n'Ikettaane, le volcan égéulé de jbel Hebri discernable grâce à ses deux pistes à ski défrichées et, à gauche, le complexe volcanique du jbel Tahabrit.

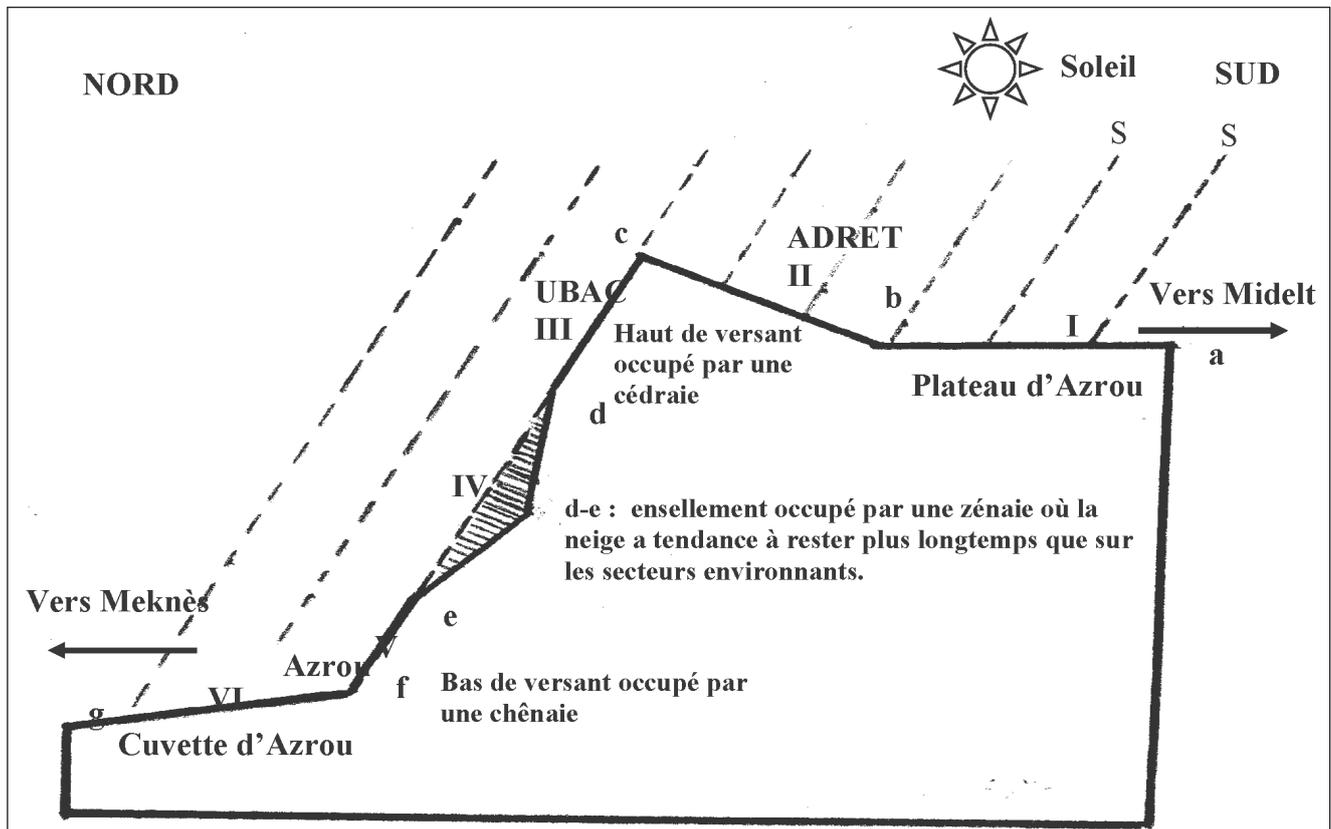


Fig. 5 – Coupe schématique du versant septentrional de la cuvette d'Azrou (Moyen-Atlas, Maroc) et de ses retombées méridionales, montrant la diversité de l'incidence des rayons solaires en fonction de l'exposition au rayonnement.

En combinant la relation entre la disposition des versants et l'inclinaison des rayons solaires avec l'altitude, pas moins de 6 topoclimats s'individualisent (I, II, III, IV, V, VI), auxquels sont associés autant de types de végétation différents. Alors que la partie comprise entre les points d et e de l'ubac est totalement dans l'ombre et n'est atteinte que par un rayonnement diffus, l'énergie reçue au sol sous forme de rayons directs est maximale entre les points b et c, en position d'adret, moyenne entre a et b (plateau) et entre f et g (cuvette), et minimale entre c et d (haut de versant) et e et f (bas de versant) où les rayons solaires sont rasants. En effet, si la même somme de chaleur est distribuée par le soleil entre deux rayons équidistants (SS), elle est répartie sur une superficie bien plus grande sur une surface de pente nulle ou peu inclinée (a-b et f-g) que sur une pente moyenne faisant face au soleil (b-c). C'est d'ailleurs à ce niveau que le sol absorbe le plus de chaleur, les rayons solaires arrivant perpendiculairement à la surface du versant. Sur le versant opposé (ubac), une pente égale à l'inclinaison des rayons solaires (en c-d et e-f) réduit considérablement la chaleur reçue et une pente plus forte (d-e) l'annule totalement. Ces contrastes d'exposition aux radiations solaires et les différences d'inclinaison se répercutent bien évidemment sur les températures (Tab.2). Cet effet de versant est plus marqué en hiver où le soleil est plus bas sur l'horizon. Cela se ressent surtout pour les températures maximales lesquelles sont d'autant plus élevées sur les adrets par rapport aux ubacs que les rayons solaires les frappent à la perpendiculaire. D'autre part, l'écart entre les rayonnements solaires reçus à midi par une pente inclinée faisant face au soleil et par une surface horizontale est plus grand en hiver qu'en été. Ces différences sont atténuées au solstice d'été.

que de telles pratiques sont particulièrement adaptées à l'exploitation et la conservation des ressources pastorales réparties dans le temps et dans l'espace.

Dans le premier topoclimat, se déployant sur une dizaine de kilomètres entre 1900 et 1800 m d'altitude, l'on note, au milieu d'un paysage végétal dominé par une steppe à *Genista pseudopilosa* Coss. Mêlée de *Helianthemum croceum* Pers. ou une thymélée à *Thymelaea virgata* Endl., la présence d'îlots forestiers spontanés de cèdre et de chêne vert strictement cantonnés aux pentes des cônes volcaniques, des cratères et des cavités d'effondrements qui parsèment le plateau basaltique d'Azrou (Photos 17 et 18). Les cédraies présentent toutefois un gradient décroissant de densité et belle venue du nord-ouest au sud-est parallèlement à la diminution des précipitations, tombant essentiellement sous forme de neige, à mesure que l'on s'enfonce dans le plateau en direction de Timahdit et que l'on s'éloigne du pôle le plus humide formée par les édifices volcaniques de Michlifène et de la paire Habri-hébri. En témoigne les

moyennes des totaux pluviométriques qui avoisinent ou dépassent les 1000 mm par an (PUJOS, 1966; MARTIN, 1981). Ceci est du surtout à l'orientation de l'escarpement d'Azrou (Fig. 5) qui fait figure de barrière orographique et qui reçoit de plein fouet les masses d'air océaniques. En bloquant partiellement ces flux humides, il contraint les nuages à déferler plus lentement en se condensant sur le secteur le plus élevé du plateau. Il en résulte que la limite méridionale de ce compartiment topoclimatique s'identifie à la fois au seuil inférieur des neiges hivernales et à celui du cèdre qui disparaît totalement à la descente de la plaine de Guigou où la masse d'air subit une nouvelle décélération.

À l'intérieur de ce compartiment, compte tenu du climat régional favorable, ont été plantés des boisements de cèdre en bas de versants et en contrebas des cônes volcaniques, ainsi que sur les replats qui les jouxtent, avec plus ou moins de réussite. En effet, le résultat au bout de quelques années est une sorte de mosaïque juxtaposant des sites où les arbres ont souffert de dépérissement, et d'autres où ils

se sont développés normalement. En fait dans les premiers, le mauvais drainage de la pouzzolane colmatée d'argile provenant de son altération plus ou moins poussée sur les pentes et son engorgement consécutif dans les bas-fonds constitue à la fois un biotope asphyxiant en hiver et un habitat très sec en été pour les racines de la plantule du cèdre. Les stress hydriques qui découlent de ce bilan hydrique très irrégulier du substrat s'interfèrent avec le froid hivernal, en combinaison avec divers facteurs climatiques aggravants notamment des températures minimales anormalement basses, un vent très violent, pour éliminer toute possibilité de survie du cèdre. Dans les seconds, l'action néfaste de l'hydromorphie du substrat ainsi que la violence du vent est atténuée en raison soit du fait de la présence d'affleurements rocheux soit en raison du ruissellement le long des bas de pentes (pouzzolane de structure plus grossière et donc plus aérée).

L'autre topoclimat succède vers le sud au précédent et s'en distingue par une plus grande continentalité avec des précipitations moins importantes (300-400 mm) consécutives à un léger effet de foehn. On peut d'ailleurs s'en rendre compte de ce dernier, en observant, par temps moyennement perturbé, que le ciel est très vite débarrassé de nuages dès la retombée du plateau d'Azrou sur la plaine du Guigou et constitue de fait une limite climatique entre les deux topoclimats. Ce bassin sous le vent est d'une large cuvette qui s'étend également sur une dizaine de kilomètres entre des altitudes moyennes allant de 1800 à 1700 m. Ici aussi prédomine un paysage steppique où prospère *Artemisia mesatlantica* Maire mêlée de *Thymus. zygis* L., interrompu par endroits de rares piquetés d'individus isolés de genévrier oxycèdre strictement localisés sur de petits affleurements rocheux sombres qui émergent des épanchements basaltiques. Ce micro-habitat a l'avantage d'assurer un certain degré d'échauffement de ce biotope. Outre cette compensation, leurs fissures atténuent encore plus la forte contrainte évoquée ci-dessus, d'une part en offrant un abri pour les jeunes plantules et d'autre part en facilitant l'infiltration d'eau et le drainage naturel, ce qui empêche l'engorgement en eau du sol et une amélioration du régime hydrique par compensation. Par contre, dans les dépressions argilo-limoneuses, le genévrier oxycèdre n'arrive plus à subsister en raison d'une hydromorphie saisonnière excessive de ce substrat. En effet, les précipitations de la saison humide aussi courtes soient-elles, qui s'abattent dans la majorité des cas sous forme liquide, provoquent selon la topographie, soit des épandages en nappes, soit des réseaux de ravinements et/ou remontée de la nappe. Et tout cela concourt à la formation d'une multitude de mares temporaires, insoupçonnées durant la saison sèche, qui se maintiennent plus ou moins longtemps dans le paysage. Sur ces substrats où alternent la sécheresse et l'engorgement par l'eau *Artemisia herba alba* remplace *A. mesatlantica*. Finalement, cette plus grande disponibilité en eau peut donc avoir des effets favorables sur la végétation arborée de sols bien drainés ou défavorables pour des sols à hydromorphie temporaire. On conçoit dès lors la nécessité de savoir analyser avec sûreté les conditions physiques caractérisant les milieux forestiers ou à vocation forestière que l'on doit aménager, sous peine, bien évidemment, de s'exposer aux mêmes échecs et mêmes difficultés.

Les remarques précédentes montrent combien il est important de gérer de manière raisonnée les écosystèmes forestiers, en particulier ceux d'altitude en raison de la

multiplicité des situations topoclimatiques, mais aussi des niveaux alarmants de dégradation atteints par les populations de beaucoup d'essences sous l'effet des actions humaines, directes ou indirectes, légères ou profondes, réversibles ou irréversibles. Comme nous l'avons évoqué ci-dessus, une politique de reboisement et de protection des ressources génétiques forestières au Maroc a été engagée depuis déjà quelques décennies. Cependant, les administrations forestières se trouvent de plus en plus contraintes à une option entre deux politiques impliquant des méthodes et des programmes divergents: rentabiliser sur le plan budgétaire l'exploitation du bois et sa filière, et si possible à court terme, ou intégrer l'aménagement du patrimoine forestier, dont elles sont responsables, dans un plan original de développement qui concilie aménagement, production de bois, pâturage, récolte des menus produits, tourisme, tout en maintenant les capacités adaptatives des écosystèmes forestiers en assurant la reconstitution, la restauration, voire l'accroissement de la diversité existante, avec le souci constant de maintenir des peuplements résistants ou adaptables aux éventuels risques futurs. Cela suppose aussi de favoriser au maximum la régénération naturelle ou le reboisement à partir de graines récoltées sur place lorsque l'origine autochtone d'un peuplement est certaine et d'éviter les repeuplements à partir d'un nombre limité de sources de graines qui tendent malheureusement à se substituer progressivement à la régénération naturelle, alors que celle-ci est meilleur marché et ne provoque aucune déformation des racines. De plus, dans les peuplements autochtones, les provenances d'un rajeunissement naturel sont adaptés au milieu et permettent de les faire évoluer progressivement dans une continuité dynamique de maturation qui s'intègre parfaitement dans le cycle sylvigénétique des peuplements. Néanmoins, la régénération artificielle se justifie là où l'ensemencement naturel a peu de chance de réussir ou lorsque les semences des essences désirées font défaut, et là où il est nécessaire de régénérer des boisements issus de provenances non adéquates.

Concernant ce dernier aspect, il est nécessaire de souligner que l'introduction massive de provenances exotiques au sein de ces populations naturelles indigènes, même si elles présentent un certain nombre de propriétés considérées plus avantageuses par les forestiers (croissance rapide, production de bois et/ou de fibres plus importante), risque de perturber leur structure naturelle qui a mis des siècles, voire des millénaires pour s'édifier. Si son incidence sur le fonctionnement des écosystèmes n'est pas vraiment toujours démontrée pour l'instant, l'introggression ou hybridation, suite à l'introduction d'essences allochtones, peut aboutir à des phénomènes de pollution génétique, gommant l'originalité intraspécifique et anéantissant le processus d'adaptation des populations locales par la perte de la « mémoire génétique » du passé des événements sélectifs, comme le montrent MCKAY & al., 2005. Par ailleurs, l'appauvrissement génétique qui en découle pourrait contribuer à la mal-adaptation et à la fragilisation des populations vis-à-vis des modifications, à long terme, du milieu, d'autant plus que les stress climatiques pourraient être plus fréquents et plus longs (LE TACON & al., 2001).

Il convient par ailleurs de tenir compte de ces éventuels brassages lors de l'introduction à des fins de reforestation de taxons allochtones voisins des indigènes des points de vue taxinomique, mais aussi de populations génétiquement

différentes d'un même taxon, afin d'éviter d'éventuelles pertes dramatiques du capital génétique. Dans ce cas, il faut aussi prendre en compte le comportement autoécologique des différentes essences qui doit être intégré pour apprécier l'adéquation de telle ou telle espèce avec les conditions écologiques offertes par les divers types topoclimatiques et donc déterminer l'essence qui pourrait être présente en fonction de ces conditions.

Au final, ce sont donc les provenances locales que les généticiens forestiers devraient privilégier pour le reboisement dans les différentes situations écologiques des régions montagneuses. La reforestation de zones dégradées doit tout particulièrement se faire avec des semences de la même origine géographique ou d'origine géographiquement proche de la zone à reconstituer, en considérant la variation biogéographique comme critère d'échantillonnage et de stratégie de collecte des graines.

D'autres auteurs comme BROADHURST & al. (2008) recommandent que les semences de l'approvisionnement devraient moins se concentrer sur les provenances locales et plus sur la récolte de haute qualité et de graines génétiquement différentes. Toujours, selon ces mêmes auteurs, cette stratégie devrait maximiser le potentiel d'adaptation des efforts de restauration aux changements environnementaux actuels et futurs. Cependant, la caractérisation des ressources génétiques, la conservation et la mise en valeur de la diversité génétique des écosystèmes forestiers marocains incluant l'identification de nouvelles variétés adaptées et résistantes aux différents stress biotiques et abiotiques, sont relativement peu exploitées à l'heure actuelle. En effet, il est indispensable de disposer de données sur la génétique et la biologie des essences forestières de façon à développer une stratégie appropriée de conservation (*in et ex situ*) à long terme et de mettre à la disposition du forestier reboiseur des graines certifiées, de qualité génétique supérieure.

Face à ce constat, compte tenu de l'équilibre économique et démographique fragile de la plupart des massifs montagneux, de la grande diversité des cas de figure au sein d'un même massif, et dans un contexte socio-économique difficile qui oblige à la réduction des coûts, la projection dans l'avenir passe par une identification des enjeux forestiers prioritaires en termes de mobilisation et de valorisation économique des bois pour la création ou le maintien d'une activité économique locale, en termes de préservation du patrimoine biologique ou en termes de paysages et d'accueil du tourisme.

V – CONCLUSIONS

Milieux relativement peu anthropisés, les forêts du Moyen et Haut Atlas, en particulier celles de moyenne et haute altitude, est riche d'une diversité d'essences adaptées à de multiples facettes topoclimatiques. Elles sont à cet égard un réservoir important de gènes forestiers naturels où chaque essence est représentée dans son aire naturelle par des ensembles de populations aux caractéristiques génétiques propres, adaptés aux conditions écologiques locales, dotés de différentes stratégies colonisatrices (type de pollinisation, pouvoir de dissémination des semences, quantité et taille des graines, mode de germination, développement des semis, vitesse de croissance, taux de recrutement et de mortalité...). Ce stock, garant de la pérennité du peuplement dans le temps,

lui permettant de continuer à exister, à se diversifier, à être le support de mutations ou de recombinaisons immédiatement adaptatives ou non et pour rendre possible la différenciation d'écotypes, constitue le fond auquel l'homme doit recourir en vue de l'amélioration ou la restauration des écosystèmes forestiers.

L'autre originalité réside dans le fait qu'elle remplit de nombreuses fonctions plus importantes qu'en plaine dans des conditions climatiques et/ou économiques particulièrement difficiles dans certaines situations. Maintenir cette palette d'espèces arborées renforce la nécessité de développer et d'affiner les connaissances de leur comportement et de leur dynamique.

Ces particularités rendent nécessaires l'élaboration d'une typologie précise, qui doit impérativement s'appuyer sur l'étude des paramètres topoclimatiques et celle de la végétation forestière. Dans cette perspective, pour bien comprendre le déterminisme de la répartition et la diversité des peuplements forestiers, l'analyse de l'hétérogénéité climatique doit être abordée à la fois aux niveaux spatial et temporel.

Dans le présent travail, pour pallier à l'insuffisance des données chiffrées sur le climat de ces montagnes, nous avons montré comment la connaissance de la topographie du lieu considéré et les phénomènes météorologiques qui s'y déroulent permettait de caractériser les topoclimats. Ainsi, très souvent les contrastes observés à l'échelle topoclimatique peuvent être rapidement décelés et que l'on peut relier à un certain nombre de facteurs explicatifs facilement observables ne nécessitant pas des connaissances très approfondies tels que l'exposition au rayonnement solaire (et les modifications du bilan énergétique de la surface du sol qui en découlent), l'orientation par rapport aux vents porteurs de pluie, ou encore les écoulements particuliers des masses d'air. Le suivi de l'enneigement et de l'enneigement contribue par ailleurs à identifier les gradients thermiques et pluviométriques. Il est toutefois nécessaire de disposer de données statistiques moyennes, simples indicatifs des grands traits du climat régional.

Cependant, si les résultats des mesures des éléments climatiques constituent la base de toute délimitation topoclimatique, ceux fondées sur les données empiriques de la distribution spatiale des facteurs influençant le climat à l'échelle locale n'en constitue pas moins une source considérable d'informations en montagne aux côtés de celles fournies par les cartes topographiques. Cette approche permet ainsi d'exploiter au mieux les données des réseaux météorologiques existants en rendant possibles les extrapolations et interpolations. Avec les précautions d'usage, les températures et les précipitations peuvent être estimées en tout lieu à partir des informations recueillies en quelques points de mesure. L'autre atout majeur est son faible coût eu égard à la valeur des informations obtenues.

Par ailleurs, au travers des exemples développés qui ne reflètent que partiellement la complexité du problème, on peut aussi affirmer que l'intérêt de cette méthode d'approche de l'étude des topoclimats est triple:

- 1- Sur le terrain, elle facilite le travail du cartographe.
- 2- Sur le plan scientifique, elle renseigne le phytoécologue sur les conditions édapho-topoclimatiques et le fonctionnement des écosystèmes.
- 3- Sur le plan pratique, elle donne au sylviculteur de

précieuses indications sur les potentialités des stations et les moyens de les améliorer.

Toutefois, la mise œuvre de cette démarche nécessite d'abord une bonne connaissance portant sur la végétation, mais aussi dans les domaines de la météorologie de montagne, de la géomorphologie et de la pédologie, un acquis important permettant de déceler rapidement des indices. Mais cette connaissance et son affinement seront parfaitement insuffisants si l'on ne savait identifier avec sûreté sur le terrain la variabilité des conditions du milieu, afin de raisonner au mieux le choix des opérations sylvicoles à leur appliquer. Par exemple en présence des espèces arborées et/ou de peuplements forestiers rares ou en régression ou ayant des caractéristiques écologiques originales, il est nécessaire d'infléchir les modes de gestion dans le sens de leur préservation.

Il doit rester bien entendu que la démarche préconisée n'est qu'une méthode de travail et non pas une fin en soi. Si elle représente un moyen souple et rapide de traitement, puis de diffusion de l'information ; elle a besoin, à tous les niveaux, de s'appuyer sur d'autres méthodes de recherche.

BIBLIOGRAPHIE

- ANDRÉ J., 1997 – *La phase hétérotrophe du cycle sylvigénétique*. – Dos. En. INRA 15: 87-99.
- ARONSON J., FLORET C., LE FLOC'H E., OVALLE C. & PONTANIER R., 1993 – *Restoration and rehabilitation of degraded ecosystems in arid and semi-arid lands. I. A view from the South*. – *Restoration Ecology* 1: 8-17.
- ARNO S. F. & HAMMERLY R. P., 1985 – *Timberline mountain and arctic forest frontiers*. – *The Mountainers*: p. 304.
- ARQUILLIERE S., 1986 – *Morphologie, croissance, reproduction végétative de l'épicéa (Picea abies (L.) Karsten) dans une de combat subalpine: Massif du Taillefer, Alpes dauphinoises*. – Thèse Doctorat de 3^{ème} cycle, Université Joseph Fournier de Grenoble 1: p. 265.
- BAILEY R. G., 2009 – *Ecosystem geography: From ecoregions to sites*. – Ed. Springer: p.251.
- BARBERO M. & QUEZEL P., 1984 – *Caractérisation bioclimatique des étages de végétation forestière sur le pourtour méditerranéen. Aspects méthodologiques posés par la zonation. Ecologie des milieux montagnards et de haute altitude*. – Documents d'Ecologie Pyrénéenne 3-4: 49-56.
- BARBERO M., BONIN G., LOISEL R. & QUÉZEL P., 1990 – *Changes and disturbances of forest ecosystems caused by human activities in the western part of the mediterranean basin*. – *Vegetatio*, 87: 151-173.
- BARNES B. V., ZAK D. R., DENTON S. R. & SPURR S. H., 1998 – *Forest ecology*. – John Wiley & Sons, 4th ed.: p.774.
- BARRY R. G. & VAN WIE C. C., 1974 – *Topo- and microclimatology in alpine areas*. In: IVES J. D & BARRY R. G. (ed.) *Artic and alpine environments* – Methuen, London: pp. 73-83.
- BARRY R. G., 1992 – *Mountain weather and climate* – Routledge, London and New York 2nd ed.: p. 402.
- BELTRANDO G., DAHECH S. & MADELIN M., 2008 – *L'intérêt*

de l'étude des brises thermiques: exemples des brises littorales et orographiques. – Bull. Soc. Géog. Liège 51: 49-61.

- BIGRAS F. J. & COLOMBO S. J., 2001 – *Conifer cold Hardiness*. – Kluwer Academic Publishers: p.596.
- BLONDEL J., 1999 – *La dynamique de la forêt naturelle*. In: *Actes du colloque «la bioqualité dans la gestion forestière»* – 12 sept. (1995, LLN, Belgique). Forêt wallonne 39-40: pp. 7-15.
- BLONDEL J. & MÉDAIL F., 2009 – *Biodiversity and conservation*. In: WOODWARD J. (ed.) *The physical geography of the Mediterranean*. – Oxford University Press: pp. 615-650.
- BLONDEL J., ARONSON J., BODIOU J.-Y & BŒUF G., 2010 – *The mediterranean basin biological diversity in space and time*. – Oxford University Press: p. 376.
- BÖHNER J. & ANTONIĆ O., 2009 – *Land-surface parameters specific to topo-climatology*. In: HENGL T. & REUTER H. I. (eds.) *Geomorphometry: Concepts, software, applications*. – *Developments in Soil Sciences* 33: 195-226.
- BOUET M., 1973 – *Sur le rôle climatique du foehn*. – Bull. Soc. Vaud. Nat., 342, 72, 8, pp. 393-399.
- BOURNERIAS M., 1982 – *À propos du climax*. – C. R. Soc. Biogéogr. 58 (3): 125-134.
- BRECKLE S., 2002 – *Walter's vegetation of the earth: The ecological systems of the geo-biosphere*. – Springer 4th. edn.: p. 547.
- BRINKMAN W.A.R., 1971 – *What is a foehn?* – *Weather* 26: 230-239.
- BROADHURST L. M., LOWE A., COATES D. J., CUNNINGHAM S. A., MCDONALD M., VESK P. A. & YATES C., 2008 – *Seed supply for broadscale restoration: maximizing evolutionary potential*. – *Evol. Appl.* 1: 587-597.
- BROWN J. H., STEVENS G. C. & KAUFMAN D. M., 1996 – *The geographic range: size, shape, boundaries, and internal structure*. – *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 27: 597-623.
- BRUSSARD P. F., 1984 – *Geographic patterns and environmental gradients: The central-marginal model in Drosophila revisited*. – *Ann. Rev. Ecol. Syst.* 15: 25-64.
- CANTAT O. & COCHARD P.-O., 1998 – *Topoclimat et refuges biogéographiques thermoxérophiles: le cas des escarpements rocheux de la Suisse Normande*. – Bull. Assoc. Géogr. Franç., 3: 324-3331.
- CARREGA P., 1994 – *Topoclimatologie et habitat. Analyse spatiale quantitative et appliquée*. – Rev. De Géogr. du lab. d'analyse spatiale Raoul Blanchard n°35 et 36. U.F.R. Espaces et cultures. Université de Nice-Sophia Antipolis : p. 40.
- CARREGA P., 1997 – *Les topoclimats dans le domaine méditerranéen*. In: *le climat, l'eau et les hommes*. – Ouvrage en l'honneur de Jean Mounier, Presses Universitaires de Rennes: pp. 281-300.
- CARREGA P., 2008 – *Le vent: importance, mesures, modélisation et tribulations*. – Bull. Soc. Géog. Liège 51: 17-29.
- CHAPPAZ R., 1975 – *L'effet de foehn dans la plaine d'Alsace et sa prévision*. – *Météorol. Nat., Monogr.* 97: 41.
- CHOISNEL E., 1984 – *Notions d'échelle en climatologie*. – La Météorologie, 7^{ème} série 4: 44-52.
- CHOISNEL E., 1987 – *Aspects topoclimatiques : une*

- méthodologie d'étude en région de moyenne de montagne. *Agrométéorologie des régions de moyenne montagne, Toulouse*. – Ed. I.N.R.A. 39:177-195.
- CHOISNEL E., 2001 – *L'homme et les climats*. – La Météorologie 35: 36-47.
- CHOISNEL E. & SEGUIN B., 1987 – *Problèmes d'échelle et réseaux météorologiques en zone de moyenne montagne. Agrométéorologie des régions de moyenne montagne, Toulouse*. – Ed. I.N.R.A., 39:37-49.
- CHOISNEL E. & JACQ V., 1987 – *Une méthodologie d'étude des topoclimats*. – Presse thermique et climatique 124(4): 188-196.
- COLWELL R. K., BREHN G., CARDELÚS C. L., GILMAN A. C. & LONGINO J. T., 2008 – *Global warming, elevational range shifts, and lowland biotic attrition in the west tropics*. – Science 322: 258-261.
- DEFANT F., 1951 – *Local winds. Compendium of Meteorology*. – T.M. Malone, (eds), Amer. Meteor. Soc.: pp. 655-672.
- DIDIER L. F., 1998 – *La limite supraforestière dans les Alpes: un nouveau regard sur sa structure et sa dynamique, à la lumière des successions post-pastorales et grâce à la théorie de la hiérarchie (l'exemple des gorges houillères en moyenne Maurienne, dans les Alpes françaises du Nord)*. – Thèse de Doctorat, Université Joseph Fournier de Grenoble 1, t. 1 : 363, t. 2 : 313.
- DOUGUEDROIT A., 1980 – *Les topoclimats de la Haute-vésubie (Alpes-Maritimes, France)*. – Méditerranée 4: 3-11.
- DOUGUEDROIT A., 1987 – *Les topoclimats thermiques de moyenne montagne*. – Agrométéorologie des régions de moyenne montagne, Toulouse, 16-17 avril 1986, Ed. I.N.R.A., 39:197-213.
- DOYLE J. D. & DURRAN D. R., 2004 – *Recent developments in the theory of atmospheric Rotors*. – Bull. Amer. Meteor. Soc. 85: 11-16.
- DURRAN D. R., 2003 – *Downslope winds*. – Encyclopedia of Atmospheric Sciences: 644-650.
- DURRAN D. R., 1990 – *Mountain waves and downslope winds*. In: BLUMEN W. (ed.) *Atmosphere processes over complex terrain*. – American Meteorological Society, Meteor. Mon. 23(45): pp. 59-81.
- EMEIS S. & KNOCH H. R., 2009 – *Applications in Meteorology*. In: HENGL T. & REUTER H. I. (eds.) *Geomorphometry Concepts, software, applications*, Elsevier, Developments in Soil Sciences, vol 33: pp. 603-622.
- ESCOUROU G., 1981. – *Climat et environnement. Les facteurs locaux du climat*. – Masson, coll. Géogr., Paris: p.182.
- FALLOT J.-M., 1992 – *Étude de la ventilation d'une grande vallée préalpine: la vallée de la Sarine en Gruyère*. – Thèse doctorat Sc. Nat., n° 95, Université de Fribourg: p.475.
- FARINA A., 2010 – *Ecology, cognition and landscape: Linking natural and social systems*. Springer, landscapes series 11: 1-169.
- FLAHAUT C., 1901 a. – *Les limites supérieures de la végétation forestière et les prairies pseudo-alpines en France*. – Rev. Eaux et Forêts 25: 385-401.
- FLAHAUT C., 1901 b. – *Les limites supérieures de la végétation forestière et les prairies pseudo-alpines en France*. – Rev. Eaux et Forêts, 27: 417-439.
- FLOHN H., 1969. – *Local wind systems*. In: FLOHN H. (ed.) *in World Survey of Climatology 2* – Elsevier Publishing Company, Amsterdam: pp. 139-171.
- FLOHN H., 1974. – *Contribution to a comparative meteorology of mountain areas*. In: IVES J. D. & BARRY R. G. (eds.) *Arctic and alpine environments*. pp. – Methuen, London: pp.55-71.
- FRIDLEY J. D., 2009. – *Downscaling climate over complex terrain: high finescale (< 1000 m) spatial variation of near-ground temperatures in a montane forested landscape (Great Smoky Mountains)*. – Journal of Appl. Meteorol. and Climatology 48:1033-1049.
- FRITTS H.C., 1976. – *Tree rings and climate*. – Academic Press, London: p. 567.
- GABERŠEK S. & DURRAN D. R., 2004. – *gap flows through idealized topography. Part I : Forcing by large-scale winds in the nonrotating limit*. – J. At. Sc.61: 2846-1862.
- GAUQUELIN X., 2010 – *Guide de gestion des forêts en crise sanitaire*. – IDF: p. 96.
- GEHU J.M. & GEHU-FRANK J., 1986 – *Indices phytocoenotiques d'ancienneté des forêts*. – Hommes et Terres du Nord 2/3: 107-109.
- GEIGER M., 1980 – *Recherches topoclimatiques au Palatinat*. – Recherches Géographiques à Strasbourg, 13-14: 95-102.
- GEIGER R., 1965 – *The climat near the ground*. – Harvard Univ. Press., Cambridge, Massachusett: p. 611.
- GEIGER R., 1969 – *Topoclimates*. In: FLOHN H. (ed.) *General Climatology, World Survey of Climatology 2*. – Elsevier, Amsterdam: pp. 105-138.
- GEIGER R., ARON R.H. & TODHUNTER P., 2009. – *The climate near the ground*. – Rowman & Littlefield Publishers, Inc, 7th ed., USA: p. 623.
- GERBIER N., 1965 – *Meteorology and the Desert locust*. – F.A.O., Progress Report n° UNSF/DL/OP/5: p.149.
- GIORGI F., 2006 – *Climate change hot-spots* – Geophysical Research Letters 33: L08707.
- GODRON M., 1966 – *Essai d'application de quelques éléments simples de la théorie de l'information à l'étude de la structure et de l'homogénéité de la végétation*. – Thèse Doct. Ing., Université de Montpellier: p. 67.
- GODRON M., 1967 – *Les groupes écologiques imbriqués «en écailles»* – Oecol. Plant. 2: 217-226.
- GOSSELIN M. & LAROISSINIE O., 2004 – *Biodiversité et gestion forestière: connaître pour préserver. Synthèse bibliographique et premières recommandations*. – Coll. Études du Cemagref, série Gestion des territoires 230: 320.
- GOSZ J. R., –1993 – *Ecotone hierarchies*. – Ecol. Appl. 3(3):369-376.
- GRABHERR G., GOTTFRIED M. & PAULI H., 1994 – *Climate effects on mountain plants*. – Nature 369:p 448.
- GRACE J., 1977 – *Plant Response to wind*. – Academic Press:p. 204.
- GREGORIUS H.-R. & WERDER H. v., 2002 – *On a genetic assessment of the adaptedness of forest reproductive material*. – Theor. Appl. Genet. 104: 429-435.
- GROOM M. J., MEFFE G. K. & CARROLL C. R., 2006 – *Principles of Conservation Biology*. –Sinauer Associates, Sunderland, 3rd ed.: p.793..

- GUEYMARD C., 1975 – *Influence de la topographie sur la distribution du rayonnement solaire. Calculs théoriques, cartographie et application pratique dans le Massif des Albères* – (P. O.). DEA USTL, Montpellier: p.63.
- GUREVITCH J., SCHEINER S. M. & FOX G. A., 2006. – *The ecology of plants*. – Sinauer Associates, 2nd ed.: p.574.
- GUYOT G., 1999 – *Climatologie de l'environnement. Cours et exercices corrigés*. – Dunod, 2^{ème} éd.: p.525.
- HAMRICK J. L., GODT M. J. W. & SHERMAN-BROYLES S. L., 1992 – *Factors influencing levels of genetic diversity in woody plant species*. – *New Forests* 6: 95-124.
- HANSEN A. J., DICASTRI F. & NAIMAN R., 1988 – *Ecotones: what and why ?* In: *A new look at ecotones: Emerging International Projects on Landscapes Boundaries*. – DICASTRI F., HANSEN A. J. & HOLLAND M. M.(eds.) *Biol. Int. Epec.* 17: 9-46.
- HARTMANN G., NIENHAUS F., BUTIN H. & WINTER K., 1991 – *Les symptômes de dépérissement des arbres forestiers. Atlas de reconnaissance en couleurs des maladies, insectes et divers*. – Edition française, IDF: p.256.
- HATTEMER H. H., 1995 – *Concepts and requirements in the conservation of forest genetic resources*. – *Forest Genetics* 2: 125-134.
- HATTEMER H. H. & MÜLLER-STARCK G., 1988 – *Genetic aspects of artificial stand establishment*. – *Genetische Aspekte der Kunstlichen Bestandesbegrundung*. *Forstarchiv* 59: 12-17.
- HERTENSTEIN R. F. & KUETTNER J. P., 2005 – *Rotor types associated with steep lee topography: Influence of the wind profil*. – *Tellus* 57A: 117-135.
- HESS M., 1969 – *Méthode pour déterminer l'influence des formes de terrain sur le climat dans les montagnes*. – *La Météorologie*, n° special: pp.75-85.
- HOEKSTRA J.M., BOUCHER T.M., RICKETTS T.H. & ROBERTS C., 2005 – *Confronting a biome crisis: global disparities of habitat losds and protection*. – *Ecol. Lett.* 8: 23-29.
- HOLTMEIER F.-K., 2009 – *Mountain timberlines. Ecology, Patchiness, and Dynamics*. – Springer, *Advances in Global Change Research* 36: p.437.
- HOLTMEIER F.-K. & BROLL G., 2010 – *Wind as an ecological agent at treelines in North America, the Alps, and the European Subarctic*. – *Phys. Geogr.* 31 (3): 203-233.
- HOWARD J.A. & MITCHELL C.W., 1985 – *Phytogeomorphology*. – Ed. John Wiley & Sons: p. 222.
- HUFKENS K., SCHEUNDERS P. & CEULEMANS R., 2009 – *Ecotones in vegetation ecology: methodologies and definitions revisited*. – *Ecol. Res.* 24(5): 977-986.
- HUFTY A., 1986. – *Adrets et ubacs, variation sur un archétype*. – *International Symposium on Urban and Local Climatology*, 20-21 février 1986, Freiburg (R.F.A.): pp. 249-256.
- HUFTY A., 2001 – *Introduction à la climatologie. Le rayonnement et la température, l'atmosphère, l'eau, le climat et l'activité humaine*. – Ed. De Boeck Université: p.540.
- IPCC, 2007 – *Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. – SOLOMON S., QIN D., MANNING M., CHEN Z., MARQUIS M., AVERYT K. B., TIGNOR M. & MILLER H. L. (eds), Cambridge University Press: p.996.
- IZARD M., CASANOVA H., DEVAU B. & PAUTOU G., 1985 – *Continentalité et notion de zone interne dans les Pyrénées*. – *Acta Oecologica, Oecol. Gener.* 6(4): 317-344.
- JEANNERET F. & RUTISHAUSER T., 2010 – *Phenology for topoclimatological surveys and large-scale mapping*. In: HUDSON I. L. & KEAYLY M. (eds.) *Phenological Research: Methods for Environmental and climate change analysis*. – Springer: pp. 159-175.
- KAREIVA P., TAILLIS H., RICKETTS T. H., DAILY G. C. & POLASKY S., 2011 – *Natural Capital: Theory and practice of Mapping Ecosystem Services*. – Oxford University Press: p.365.
- KÖRNER C., 2007 – *The use of 'altitude' in ecological research*. – *Trends Ecol. Evol.* 22(11): 569-574.
- KÖRNER C. & PAULSEN J., 2004 – *A world-wide study of high altitude treeline temperatures*. – *J. Biogeogr.* 31: 713-732.
- KREMER A., 2000. – *Changements climatiques et diversité génétique*. – *Rev. Forest. Franç.*, n° sp.: pp. 91-98.
- KREMER A., 2005 – *Réponses adaptatives des arbres aux changements climatiques : mécanismes évolutifs et vitesses de réponse*. In: *La forêt face aux changements climatiques – Acquis et certitudes*. Éd. GIP Ecofor.
- KRUCKBERG A. R., 2002 – *Geology and plant life. The effects of landforms and rock types on plants*. – University of Washington Press, Seattle: p. 362.
- KUETTNER J., 1959 – *The rotor flow in the lee of mountains*. – GRD Research Note 6, Air Force Cambridge Research Laboratories: p. 20.
- LAMANDÉ M., RANGER J. & LEFÈVRE Y., 2005 – *Effets de l'exploitation forestière sur la qualité des sols*. – *Les Dossiers Forestiers* 15: p.131.
- LAWTON J. H., 1993 – *Range, population abundance and conservation*. – *Tree* 8(11): 409-413.
- LENZ O., 1967 – *Action de la neige et du gel sur les arbres de montagne, en particulier sur leur forme et l'anatomie de la tige*. *Mém. Inst. Suisse de recherches forestières* 43(3): 293-314.
- LESTER P. F., 1993 – *Turbulence: A new perspective for pilots*. – Englewood Jeppesen: p.278.
- LESTER P. F., 2007 – *Aviation weather*. – Englewood, Jeppesen, third ed.: p.466.
- LE TACON F., SELOSSE M.-A & GOSSELIN F., 2000 – *Biodiversité, fonctionnement des écosystèmes et gestion forestière. Première partie*. – *Rev. For. Fr.*, LII 6:477-495.
- LE TACON F., SELOSSE M.-A & GOSSELIN F., 2000 – *Biodiversité, fonctionnement des écosystèmes et gestion forestière. Deuxième partie: interventions sylvicoles et biodiversité*. – *Rev. For. Fr.*, LIII 1: 55-80.
- LITTMANN T., 2008 – *Topoclimate and Microclimate*. In: BRECKLE S.-W. & al. (eds.) *Arid due ecosystems*: pp. 175-182. – *Ecological Studies* 200, Springer-Verlag.
- LOMOLINO M.V., RIDDLE B.R., WHITTAKER R.J. & BROWN

- J.H., 2010. – *Biogeography*. – Sinauer Associates, Fourth Edition: p.878.
- MACHATTIE L. B. & SCHNELLE F., 1974 – *An introduction to agrotopoclimatology*. – Technical note WMO, n° 133: p.131.
- MAHRT L., 1982 – *Small scale drainage front*. – Tellus, 34: 579-587.
- MAHRT L., 2006 – *Variation of surface air temperature in complex terrain*. – J. Appl. Meteor. 26: 1522-1529.
- MANION P. D., 1991 – *Tree disease concepts*. – Prentice Hall, New Jersey: p. 402.
- MAZZOLENI S., DI PASCALE G., DI MARTINO P., REGO F. & MULLIGAN M., 2004 – *recent dynamics of Mediterranean vegetation and landscape*. – John Wiley and Sons: p. 306.
- MCKAY J. K., CHRISTIAN C. E., HARRISON S. & RICE K. J., 2005 – “How local is local?” – *A review of practical and conceptual issues in the genetics of restoration*. – Restor. Ecol. 13(3): 432-440.
- MÉDAIL F. & QUÉZEL P., 1997 – *Hot-spots analysis for conservation of plant biodiversity in the mediterranean bassin*. – Ann. Missouri Bot. Gard. 84: 112-127.
- MICKLER R. A., BIRDSEY R. A. & HOM J. 2000. – *Responses of northern U.S. forests to environmental change*. – Springer, Ecological Studies, 139, 578p.
- MOSELER A., MAJOR J. E. & RAJORA O. P., 2003 – *Old-growth red spruce forests as reservoirs of genetic diversity and reproductive fitness*. – Theor. Appl. Genet. 106: 151-161.
- MÜLLER-STARCK G., 1995 – *Protection of genetic variability in forest trees*. – Forest Genet. 2: 121-124.
- MÜLLER-STARCK G. & SCHUBERT R. 2001. – *Genetic response of forest systems to changing environmental conditions*. – Kluwer Academic Publishers, Forestry Sciences 70, 363 p.
- NAGELEISEN L.-M., PIOUS D., SAINTONGE F.-X. & RIOU-NIVERT P., 2010 – *La santé des forêts. Maladies, insectes, accidents climatiques. Diagnostic et prévention*. – DSF/IDF: p.608.
- NEGRE R., 1982 – *Climax: utopie ou réalité*. – C. R. Soc. Biog. 58(3): 99-110.
- NORTON D. A. & SCHÖNENBERGER W., 1984 – *The growth forms and ecology of Nothofagus solandri at the alpine timberline, Craigieburn range, New Zealand*. – Arctic Alpine Res. 16(3): 361-370.
- OZENDA P., 2002 – *Perspectives pour une géobiologie des montagnes*. – Presses Polytechniques et universitaires Romandes: p.159.
- PARCEVAUX (de) S. & HUBER L., 2007 – *Bioclimatologie. Concepts et applications*. – Ed. Quae, Versailles: p.324.
- PAUL P., 1980 – *Topoclimats thermiques dans le vallon du Ringelbach*. – Recherches Géographiques à Strasbourg, 13-14: pp. 77-84.
- PAUL P., 1997 – *Topoclimats dans le domaine tempéré semi-océanique*. In: *le climat, l'eau et les hommes*. – Ouvrage en l'honneur de Jean Mounier, Presses Universitaires de Rennes: pp. 197-226.
- PEGUY C. P., 1969 – *Quelques considérations théoriques sur la variation en fonction de l'altitude des paramètres thermiques moyens*. – La Météorologie 5: 45-50.
- PERRY D. A., OREN R. & HART S. C., 2008 – *Forest ecosystems*. – The Johns Hopkins University Press, Baltimore, 2nd ed.: p.606.
- PEYRE C., 1978 – *Sur quelques climax à caducifoliées dans les montagnes du Maroc*. – Bull. Instit. Sc. 2: 39-60.
- PICARD A., 1964 – *Contribution à l'étude du sud-foehn d'Innsbruck*. – C.N.R.S., Paris: p.177.
- PIGOTT C.D. & PIGOTT S., 1993 – *Water as a determinant of the distribution of trees at the boundary of the Mediterranean zone*. – J. Ecol. 81: 557-566.
- PUJOS A., 1966 – *Les milieux de la cédraie marocaine. Étude d'une classification des cédraies du Moyen Atlas et du Rif en fonction du sol et du climat et de la régénération naturelle actuelle dans ces peuplements*. – Ann. Rech. Forest. Maroc. 8:1-283.
- PURVIS A. & HECTOR A., 2000 – *Getting the measure of biodiversity*. – Nature 405(6783): 212-219.
- QUÉZEL P. & BARBERO M., 1982 – *Definition and characterization of Mediterranean-type ecosystems*. – Ecol. Medit. 8(1/2): 15-29.
- QUÉZEL P. & MÉDAIL F., 2003 – *Que faut-il entendre par «forêts méditerranéennes»? – Forêt Médit. 24(1): 11-31.*
- RAIMONDO F.M. & VALDÉS B., 1998 – *Catalogue des plantes vasculaires rares, menacées ou endémiques du Maroc*. – Herbarium Mediterraneum Panormitanum, Palermo, Bocconea 8: 1-252.
- RAJA R. G., TAUER C. G., WITTEWIT R. F. & HUANG Y., 1998 – *Regeneration methods affect genetic variation and structure in shortleaf pine (Pinus echinata Mill.)*. – Forest Genet. 5(3): 171-178.
- RAMEAU J.-C., 1999. – *Définition et évaluation de la qualité d'un écosystème forestier*. In: *Actes du colloque “la bioqualité dans la gestion forestière”*. – 12 sept. (1995, LLN, Belgique). Forêt wallone 39-40: 37-51.
- RAMPANELLI G., ZARDI D. & ROTUNNO R., 2004 – *Mechanisms of Up-Valley Winds*. – Journal of the Atmospheric Sciences 61: 3097-3111.
- RAPHAEL M. G. & MOLINA R., 2007 – *Conservation of rare or little-known species*. – Island Press, Washington: p. 375.
- REED D. H. & FRANKHAM R., 2003 – *Correlation between fitness and genetic diversity*. – Conserv. Biol. 17: 230-235.
- REID W. V., 1998 – *Biodiversity hotspots*. – Tree 13: 275-280.
- RHANEM M., 1985 – *Etude phyto-écologique des versants de la vallée des Aït Bou Guemmez (Haut Atlas central septentrional, Maroc)*. – Th. Doct. 3^{ème} cycle, Univ. Sc. Tech. Languedoc, Montpellier, 114p+ 3cartes h.t.
- RHANEM M., 2008 a. – *Quelques résultats obtenus par l'analyse de l'information mutuelle sur les observations phyto-écologiques recueillies dans la vallée des Aït-Bou-Guemmez (Haut Atlas, Maroc)*. – Fl. Medit. 18: 471-512.
- RHANEM M., 2008 b. – *Contribution à une typologie topoclimatique en montagne méditerranéenne. Application à une vallée du Haut Atlas central, Aït-Bou-Guemmez (Maroc)*. – Quad. Bot. Amb. Appl. 19:161-172.
- RHANEM M., 2008 c. – *Quelques aspects topoclimatiques de l'étagement de la végétation spontanée en*

- montagne méditerranéenne, avec référence aux Moyen et Haut Atlas (Maroc). – Quad. Bot. Amb. Appl. 19: 183-201.
- RHANEM M., 2009 – *L'alfa (Stipa tenacissima L.) dans la plaine de Midelt (Haut bassin versant de la Moulouya, Maroc) - Éléments de climatologie.* – Physio-géo - Géographie Physique et Environnement 3: 1-20.
- RHANEM M., 2010 a. – *Approche de la conservation et de la restauration du genévrier thurifère (Juniperus thurifera L.) au Maroc à travers l'exemple de la vallée des Aït-Bou-Guemmez (Haut Atlas).* – Bull. Soc. Bot. Centre-Ouest, Nouvelle Série 41: 99-138.
- RHANEM M., 2010 b. – *Esquisse d'une typologie géomorphologique de quelques cédraies à Cedrus atlantica Man. dans le Haut Atlas oriental de Midelt (Maroc). Menaces et perspectives de conservation, de gestion et de restauration.* – Quad. Bot. Amb. Appl. 21:141-159.
- RHANEM M., 2010 c. – *Étude climatique en moyenne montagne méditerranéenne: le cas de la localité de Midelt dans le haut bassin versant de la Moulouya (Maroc) pour des fins bioécologiques.* – Quad. Bot. Amb. Appl. 21: 165-187.
- RHANEM M., 2011 – *Aridification du climat régional et remontée de la limite inférieure du cèdre (Cedrus atlantica Manetti) aux confins de plaine de Midelt (Maroc). Physio-Géo – Géographie Physique et Environnement, vol. V: pp. 143-165.*
- RHANEM M. 2013. – *De l'écologie, de la répartition et de la structure spatiale du genévrier commun hémishérique: Juniperus communis subsp hemisphaerica (Presl) Nyman au Maroc.* – Bull. Soc. Bot. du Centre-Ouest, NS, 44: 301-316
- RISSE P. G., 1995. – *The status of the science examining ecotones.* – Bioscience 45: 318-325.
- ROE G. U., 2005 – *Orographic precipitation.* – Ann. Rev. Earth Planetary SC. 33: 645-671.
- ROUGERIE G., 1990 – *Les montagnes dans la biosphère.* – Armand Colin, Paris: p.221.
- SAINTONGE F.-X., NAGELEISEN L.-M., ASSALI F. & AADEL T., 2011 – *anté des forêts marocaines: Adaptation de la stratégie d'observation du Département de la Santé des Forêts (DSF) au contexte marocain.* – Rev. For. Fr. 1: 7-16.
- SCHAETZL R. J., JOHNSON D. L., BURNS S. F. & SMALL T. W., 1989 – *Tree uprooting: review of impacts on forest ecology.* – Vegetatio 79: 165-176.
- SCHULTZ J., 2004 – *The ecozones of the world: Ecological divisions of the geosphere.* – Springer-Verlag, 2nd ed.: p. 252.
- SEIGUE A., 1985 – *La forêt circumméditerranéenne et ses problèmes.* – Éd. Maisonneuve et Larose, Paris: p. 502.
- SINCLAIR W. A. & LYON H. H., 2005 – *Diseases of trees and shrubs.* –Cornell University Press, 2nd ed.: p.660.
- SLATYER R. O. & NOBLE I. R., 1992 – *Dynamics of Montane trrelines.* In HANSEN A. J. & DI CASTRI F. (eds.) *Lnadscapes boundaries. Consequences for biotic diversity and ecological flows.* – Springer-Verlag: pp. 346-359.
- SMITH R.B., 1989 – *Hydrostatic airflow over mountains.* – Advances in Geophysic 31: pp 1-41.
- STEINER F., 2008 – *The living landscape: An ecological approach to landscape planning.* Ed. Island Press, 2nd ed.: p.470.
- STULL R., 1988 – *An introduction to boundary layer meteorology.* – Kluwer Academic Publishers: p.666.
- THILLET J.-J. & SCHUELLER D., 2009 – *Petit manuel de météo montagne.* –Ed. Glénat, Grenoble: p. 192.
- THOMPSON J. D., 2005 – *Plant evolution in the Mediterranean.* – Oxford University Press: p. 293.
- THORNTHWAITE C. W., 1954 – *Topoclimatology. Proceedings Toronto Meteorological Conference, 1953.* – Royal Meteorological Society, London: pp. 227-232.
- TRANQUILLINI W., 1979 – *Physiological Ecology of the Alpine Timberline. The Existence at High Altitudes with Special Reference to the European Alps.* – Springer-Verlag, Berlin, Ecological Studies 31: p. 137.
- TUHKANEN S., 1980 – *Climatic parameters and indices in plant geography.* – Acta Phytogeogr. Suec. 67: 1-105.
- TURCKHEIM B. de & BRUCIAMACCHIE M., 2005 – *La futaie irrégulière. Théorie et pratique de la sylviculture irrégulière, continue et proche de la nature.* Edisud: p.286.
- VALADON A., 2009 – *Effets des interventions sylvicoles sur la diversité génétique des arbres forestiers: Analyse bibliographique.* – Les Dossiers Forestiers, n° 21: p.157.
- VALLAURI D. & CHAUVIN C., 1997 – *L'écologie de la restauration appliquée à la forêt.* – Rev. For. Fr. 3:195-203.
- VAN DER MAAREL E., 1990 – *Ecotones and ecoclines are different.* – J. Veg. Sci. 1: 135-138.
- VERGEINER I. & DREISEITL E., 198 – *Valley winds and slope winds – Observations and elementary thoughts.* Meteorol. Atmos. Phys. 36: 264-286.
- WHITEMAN C. D., 1986 – *Temperature inversion buildup in Colorado's Eagle valley.* – Meteorol. Atmos. Phys. 35: 220-226.
- WHITEMAN C. D., 1990 – *Observations of thermally developed wind systems in mountainous terrain.* In: BLUMEN W. (ed.) *Atmosphere processes over complex terrain.* – American Meteorological Society, Meteorological Monographs 23(45): 5-42.
- WHITEMAN C. D., 2000 – *Mountain meteorology. Fundamentals and applications.* Oxford University Press, New york: p.355.
- WHITEMAN C.D. & ALLWINE K.J., 1985 – *Valmet. A valley Air Pollution Model. Final report.* – Pacific Northwest Laboratory. Operated for the U.S. Department of Energy by Battelle Memorial Institue. Battelle: p. 176.
- WOODWARD F. I., 1987 – *Climate and plant distribution.* – Cambridge University Press: p.188.
- WOODWARD J. (eds), 2009 – *The physical geography of the Mediterranean.* – Oxford University Press: p. 663.
- YOSHINO M. M., 1973 – *Wind-shaped trees in the subalpine zone in Japan.* – Arctic Alpine Res. 5(3): A115-A126.
- YOSHINO M. M., 1984 – *Thermal belt and cold air drainage on the mountain slope and cold air in the basin at quiet, clear night.* – Geo. J., 8(3): 235-250.

RÉSUMÉ – Au regard de leur surface restreinte, les forêts d'altitude du Moyen et Haut Atlas se distinguent de celles des niveaux inférieurs adjacents par une importante diversité s'observant tant sur le plan de leur richesse spécifique que sur celui de leur structuration. Cette hétérogénéité, mais aussi une plus grande vulnérabilité et une fragilité constituent leurs spécificités majeures. De telles caractéristiques sont imputables à l'existence d'une marquerie d'unités écologiques et de climats locaux (écoclimats), parfois très contraignants pour certains d'entre-eux, susceptibles de varier brutalement et rapidement d'un point à un autre, ce qui détermine de fait une multitude de niches écologiques aux essences arborées.

Une des préoccupations essentielles du phytoécologue est donc de rechercher, d'une part, à connaître pour chaque espèce arborée l'amplitude de tolérance et les conditions optimales vis-à-vis des paramètres écologiques et, d'autre part, d'obtenir des informations suffisantes pour l'évaluation des contraintes écologiques majeures ou secondaires sur le terrain d'étude. Les facteurs les plus décisifs et les plus pertinents sont surtout déterminés par le couple climat-topographie (topoclimat), prédominant en montagne, dont il est possible de préciser les différents types et d'établir des corrélations étroites avec la végétation forestière (plus particulièrement celle qui implique les végétaux ligneux), à condition que l'action anthropozoiq ue n'ait pas perturbé de façon excessive les équilibres naturels.

Dans les massifs du Moyen et Haut Atlas, la faible densité des postes météorologiques et leur mauvaise représentativité constituent un handicap majeur à leur appréhension écologique.

Face à l'impossibilité matérielle d'acquérir des données locales sûres en quantité suffisante et pour obvier à cette lacune, la méthode préconisée s'appuie sur des critères auxiliaires, véritables outils de la démarche, élaborés à partir des attributs ou caractéristiques du massif forestier considéré. Chaque compartiment topoclimatique est défini en premier lieu par la combinaison de trois grandeurs ayant trait à l'altitude, à l'exposition au soleil et/ou au vent humide et à la pente, paramètres immédiatement perceptibles qui permettent d'appréhender en grande partie le topoclimat. Il faut également leur adjoindre des indicateurs-repères visuels et tangibles constatés sur le terrain comme par exemple les limites altitudinales saisonnières de l'enneigement, les aspects visibles de l'effet de foehn (mur de foehn) et des inversions thermiques (lac de brouillard). C'est cet ensemble d'éléments coordonnés entre eux qui permet finalement de caractériser chaque entité topoclimatique. Sont également pris en compte des descripteurs phytologiques qui permettent, dans certains cas, de suppléer aux lacunes de notre documentation en fournissant un complément d'information indispensable à la délimitation et à la cartographie ultérieure des topoclimats: soit au sujet des températures particulièrement basses (xérophytes épineux en haute montagne...), soit sur

l'économie de l'eau (espèces xérophiles). Parfois, il est également fait appel à la géomorphologie (influences topo-édaphiques).

Outre sa valeur interprétative des conditions écologiques, l'approche présentée devrait permettre au gestionnaire forestier d'opter pour des modes d'intervention mieux adaptés aux caractéristiques écologiques et qui répondent, dans un environnement changeant, aux enjeux de gestion durable et multifonctionnelle garantissant les potentialités d'adaptation des forêts d'altitude. Elle devrait aussi contribuer à la mise en place d'une gestion conservatoire destinée à pérenniser et/ou à restaurer des milieux à valeur patrimoniale. Enfin, elle peut être facilement mise en œuvre et ne nécessite pas d'appareils de mesure. De plus, elle permet de valoriser des séries de données recueillies, même brèves ou discontinues.

RIASSUNTO – Per la loro superficie limitata, le foreste montane del Medio e dell'Alto Atlante differiscono da quelle delle quote più basse sia in termini di ricchezza floristica che di struttura. L'eterogeneità e la fragilità sono le caratteristiche principali che contraddistinguono queste foreste. Tali caratteristiche sono dovute alla presenza di un mosaico di unità ecologiche e micro-climi locali molto eterogeneo e variabile che determina una moltitudine di nicchie ecologiche.

Uno dei campi d'interesse dell'ecologia vegetale è comprendere come i fattori ecologici determinano la distribuzione delle specie arboree e quando questi diventano attori limitanti. Il fattore ecologico più rilevante in montagna è principalmente dato dalla combinazione clima-topografia (Topoclima) che, in condizioni naturali, è strettamente correlato con le caratteristiche della vegetazione forestale. Tuttavia, la mancanza di dati meteorologici per le Montagne dell'Atlante rappresenta uno dei limiti per gli studi a carattere ecologico.

In questo lavoro, viene presentato un approccio metodologico per la definizione dei Topoclimi delle foreste del Medio e dell'Alto Atlante. I tipi Topoclimatici sono definiti, in primo luogo, dalla combinazione di tre variabili relative all'altitudine, all'esposizione dei versanti e alla pendenza. A questi si aggiungono altri fattori quali i limiti stagionali della neve, l'effetto del vento, le inversioni termiche. Sono, inoltre, presi in considerazione alcuni descrittori biologici, come la presenza di xerofite, che consentono, in alcuni casi, di fornire ulteriori informazioni essenziali per la delimitazione e la successiva mappatura dei Topoclimi.

L'approccio metodologico presentato, oltre al valore interpretativo delle condizioni ecologiche, dovrebbe consentire ai gestori delle foreste strumenti per la scelta di adeguati metodi di intervento, adatti alle caratteristiche ecologiche delle foreste, in uno scenario di cambiamento climatico, di gestione sostenibile e multifunzionale.

