

## **La topoclimatologie, un thème de cartographie approprié à l'écologie des forêts d'altitude Exemples pris dans les montagnes marocaines du Moyen- et Haut-Atlas.**

**Mustapha RHANEM \***

**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 anthropozoïque 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.

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

---

\* M. R. : Unité de Botanique et Écologie Montagnarde, Département de Biologie, Faculté des Sciences, BP 11201, Zitoune, MEKNÈS, MAROC.

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 topoédaphiques).

**Mots-clés :** Topoclimat, indicateur, typologie, cartographie, Moyen- et Haut-Atlas.

**Abstract** - Considering their smaller area, the higher 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, that vary sharply and rapidly from one point to another, which in fact determines 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 relevant factors are primarily determined by climate and topography (topoclimate). One fact remains predominant in the mountains which makes it 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 their poor representation in forests of the Middle and High Atlas constitutes a major handicap to understand forests ecologically.

Faced with the impossibility of acquiring reliable local data to overcome this deficiency, the suggested method is based on assisting criteria, real tools of the approach, developed from the attributes or characteristics of the considered forest. 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, 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 to the moisture supply (drought-tolerant species). The proposed method sometimes also utilises geomorphology (topoedaphic influences).

**Keywords** - Topoclimate, indicator, typology, mapping, High and Middle Atlas

## I - Introduction

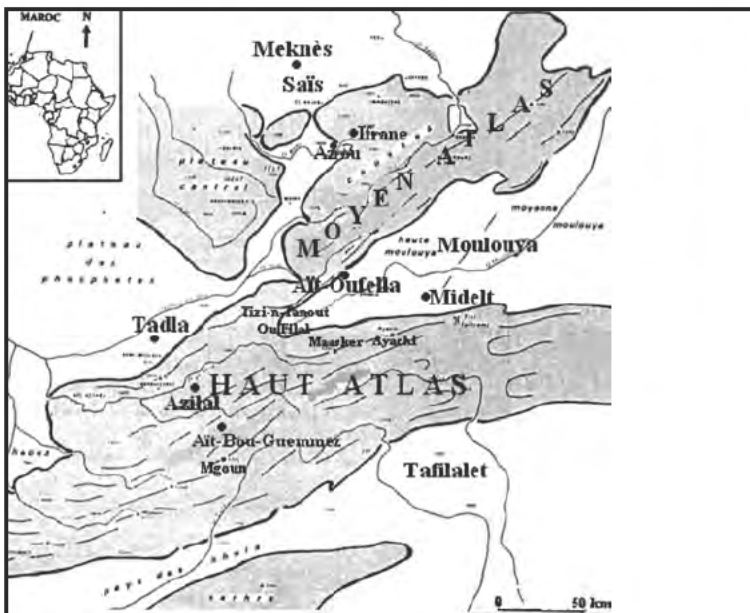
Dans leur environnement aérien et souterrain, les arbres représentent l'essentiel en phytomasse des écosystèmes forestiers et ils offrent un support au développement de nombreux autres organismes animaux et végétaux. Ces espèces clé de voûte ont par ailleurs l'avantage de bien intégrer les conditions 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 (BOURNÉRIAS, 1982 ; GÉHU et GÉHU-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 à des systèmes d'autorégulation, du moins à l'intérieur de certaines limites (BOURNÉRIAS, 1982 ; NÈGRE, 1982 ; RAMEAU, 1999 ; LE TACON *et al.*, 2000 et LE TACON *et 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.

Cependant, comme toutes les plantes supérieures, les espèces arborées 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 de 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 et PAULSEN, 2004) mais aussi par la disponibilité en eau (PIGOTT et 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 et BARBERO, 1982 ; BARBERO et 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 et MÉDAIL, 2003 ; BLONDEL *et 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 *et al.*, 2004), lequel est à ce titre considéré parmi les *hot-spots* du changement global (HOEKSTRA *et 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 et 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 3 000 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 topographi-



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

que, 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 SO 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 brouillards 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 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 SO-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 NO, 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. 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.

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 1 400 m dans le Rif, à 1 800 m dans le Moyen-Atlas et à 2 200 m d'altitude dans le Haut-Atlas (chiffres moyens arrondis 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. 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 relégué 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 planitiales « résiduelles » (autrefois plus étendues et moins fragmentées) dont le morcellement et la raréfaction sont le résultat de la pression constante et soutenue exercée 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 *et 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 *et al.*, 1991 ; MANION, 1991 ; SINCLAIR et LYON, 2005 ; GAUQUELIN, 2010 ; NAGELEISEN *et al.*, 2010 ; SAINTONGE *et 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 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). Certaines essences voient ainsi reculer fortement le nombre, l'étendue et/ou la richesse en individus de leurs stations (RHANEM, 2010 a et b).

Dans leur ensemble, les forêts de ces montagnes sont relativement bien conservées et regroupent une multitude d'écosystèmes forestiers qui traduit 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 ce sont 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 *et 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 concourt à augmenter encore plus le nombre 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 *et al.*, 2006 ; LOMOLINO *et 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 et MITCHELL, 1985 ; KRUCKEBERG, 2002 ; SCHULTZ, 2004 ; PERRY *et 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 en effet 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.

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 méthode

### A - Définition des limites des forêts d'altitude concernées

Les chaînes montagneuses du Moyen- et 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 végétale (MÉDAIL et QUÉZEL, 1997). De plus, en raison de leur allongement SO-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), 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 1 700 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 2 700 m d'altitude, ce dernier forme un seuil phytoclimatique bien tranché au-dessus duquel 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 comme l'on peut par exemple s'en rendre compte sur la photo 1.



**Photo 1** – Localisation habituelle du paysage asylvatique qui limite vers le haut les forêts d'altitude. Ici, la limite supérieure de la végétation arborée, bien visible, oscille entre 2 500 et 2 600 m ; elle est constituée par le cèdre de l'Atlas qui succède au chêne vert ou yeuse (*Quercus ilex* L.) à 2 300 m d'altitude.

Vue sur le versant nord du chaînon de Tafrant (3 016 m), relayé vers le sud par l'imposante muraille de Tazoulyin (3 411 m), dominant la maison forestière de Mmitaqqane, dans le massif de l'Ayachi (3 757 m). Au premier plan, la Land-Rover est à 2 100 m, peu à l'ouest du cirque de Jaafar dans le Haut-Atlas oriental de la région de Midelt.

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 2). Dans de telles conditions, cette distinction physionomique 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.

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.



**Photo 2** – Autre aspect de paysage dépourvu d'arbres, moins traditionnel, que l'on rencontre par endroits en limite inférieure des forêts d'altitude. Sur le cliché, l'on distingue, au premier plan (1 700 m), la partie méridionale de la haute plaine de la Moulouya au pied de chaînons Haut-Atlasiques. Contrairement à celui de haute montagne, ce type asylvatique infraforestier est représenté par une surface plane, légèrement inclinée vers l'ouest, laquelle est colonisée par une steppe graminéenne à alfa en mélange çà et là avec *Adenocarpus bacquei* Battand et Pitard et un individu chétif de *Retama sphaerocarpa* (L.) Boiss. beaucoup plus sporadique.

Les seuils moyens donnés ci-dessus varient évidemment en fonction des conditions locales. La durée de l'enneigement, très variable selon les années, change, 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 mois, 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 monti-méditerranéen 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 remarquable, où les limites supra- et infraforestières 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 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 - Les essences constituantes et la situation actuelle**

Dans la dition 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), *J. communis* L. (genévrier commun), *Buxus balearica* Willd. (buis des Baléares), *Fraxinus dimorpha* Coss. et Dur. (frêne dimorphe), *Lonicera arborea* Boiss. (chèvrefeuille en arbre). Mais certains éléments de souche eurasiatique (*Taxus baccata* L (if), *Ilex aquifolium* L. (houx commun), *Acer monspessulanum* L. (érable de Montpellier), *Buxus sempervirens* L.

(buis sempervirent), *Cotoneaster nummularia* Fisch. et Meyer (cotonéaster 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. (mancienne ou cochène) enrichissent significativement le cortège. 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.).

Seuls ou mélangés entre eux, ces arbres constituent par ailleurs sur les montagnes du Moyen- et Haut-Atlas une large gamme de formes forestières que l'on peut répartir sur les trois ensembles physionomiquement très différents définis par BARBERO *et 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 dernière 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. Associée 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 et HECTOR, 2000).

D'autre part, 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 et 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 hauts 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, et 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 essence 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 de 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. Aussi, est-il préférable 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 litho-morphologiques 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 3). 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. L'interaction de ces différentes variables édaphiques et des composantes climatiques (géographiques et altitudinales) et les différences qui en découlent de par leurs effets conjugués 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). Dans certains cas, nous avons eu recours à cette relation : conditions de bilan hydrique – végétation pour affiner le tracé des limites des compartiments topoclimatiques.



**Photo 3** - Coupe verticale du substrat (ensemble sol et substratum géologique) à la faveur du talus bordant la RN 13 aux abords de la cluse d'Aït-Oufella sur le revers méridional du Moyen-Atlas central montrant comment l'yeuse met en place à la fois un système racinaire profond et un autre, superficiel et traçant. On remarquera le pendage conforme des bancs de calcaires durs imposant un enracinement restant en grande partie près de la surface du substrat. Toutefois, la présence de fissures larges de quelques millimètres, plus ou moins verticales et remplies d'un résidu terreux assure au système racinaire du chêne vert un certain développement en profondeur.

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 calcaréo-marneux sont associées des formes de reliefs assez molles, aux pentes assez faibles, avec de fortes tendances érosives 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, donnent naissance à des reliefs vigoureux aux pentes fortes à raides. 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 remaniées (photo 3).

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 rares). Par ailleurs, dans le cas des calcaires en plaquettes ou des marnes calcaires schisteuses, 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.

### **C - Fragilité et santé de ces divers types de forêts d'altitude**

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 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 ;
- 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 ;

- 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 ;
- défrichement 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.

## **D - 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 *et al.*,

2009 ; THILLET et 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 et 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 *et 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.

### 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<sup>ème</sup> 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 *et 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 et VAN WIE, 1974 ; DOUGUÉDROIT, 1980 ; GEIGER, 1980 ; PAUL, 1980 ; RHANEM, 1985, 2008 a et b, 2009 ; 2010 a et c ; 2011 ; WHITEMAN et ALLWINE, 1985 ; CHOISNEL et SEGUIN, 1987 ; BAILEY, 1987 et 2009 ; CARREGA , 1994 ; CANTAT et COCHARD, 1998 ; CHOISNEL, 2001 ; ROE, 2005 ; BELTRANDO *et 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 et 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 marqueterie 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 et SCHNELLE, 1974). Par ailleurs, elle s'est avérée d'une grande utilité pour la cartographie phénologique (JEANNERET et 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).

### 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 et 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 *et 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 ; GABERŠEK et 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 et SEGUIN, 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 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.

### 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 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 décelés à l'échelle du kilomètre et s'expriment par conséquent beaucoup plus clairement sur les cartes topographiques au 1/50 000<sup>e</sup>. 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. 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, 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 cédraies 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 4 et 5).

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. 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 NO (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





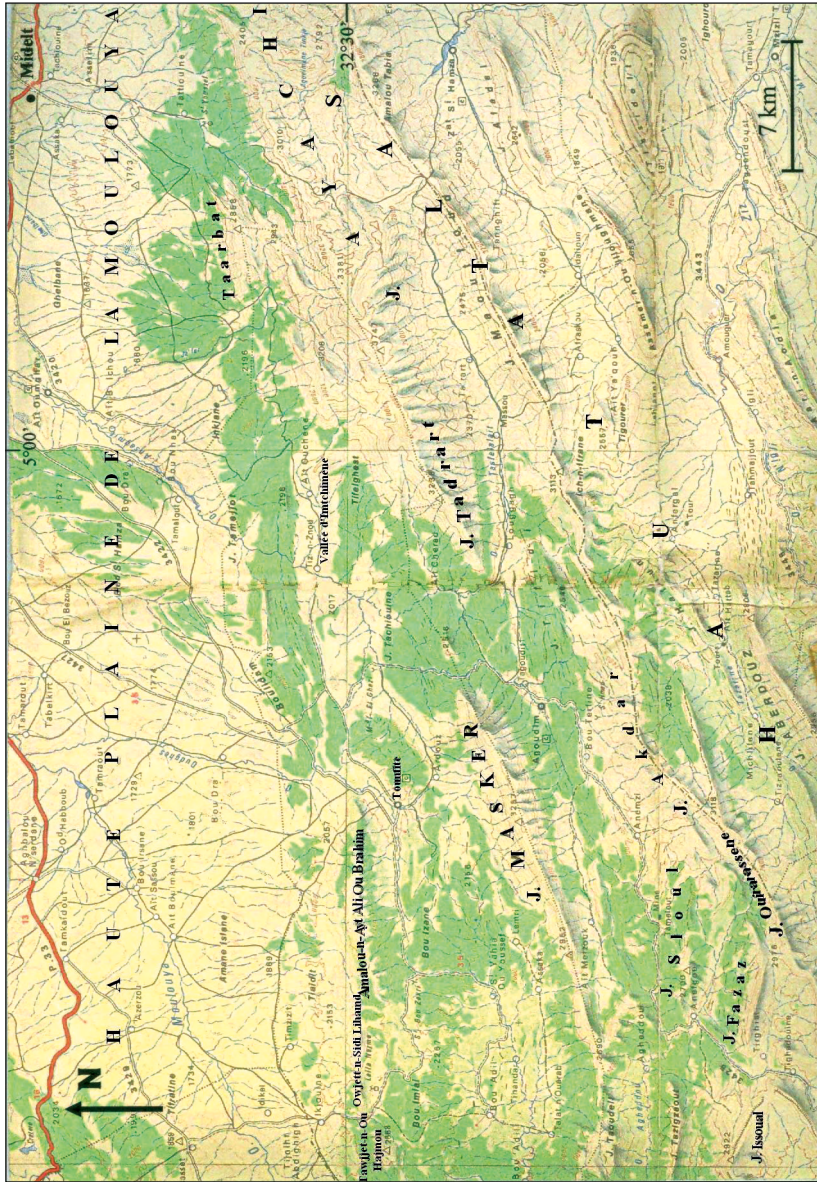


Figure 3 - Disposition des reliefs montagneux dans la partie occidentale de la région de Midelt au sud de la haute plaine de la Moulouya où se concentrent les peuplements de cèdre de l'Atlas de la chaîne du Haut-Atlas (RHANEM, 2010 b). Extrait de la carte du Maroc au 1/250 000, feuille NI-30-13 KHENIFRA.

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 celle-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* O-E : la première étant la plus modérée, est constituée par les jBELS Tawjjet -n- Ou Hajmou (2 654 m), Owjjet -n- Sidi Lihamd et Amalou -n- Ayt Ali Ou Brahim (2 646 m), alors que la deuxième, constituée par les jBELS Maasker (3 265 m) 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). 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 2 300 m aux alentours du cirque de Jaafar.

### 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 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 1 200 m sur l'adret du Tizal (photo 6) de sorte qu'après son passage au-dessus de cette imposante barrière, l'air redescend d'autant plus rapidement que les pentes sont raides



**Photo 4** - Cédraie du jbel Owjjet -n- Sidi Lihamd (2763 m) dans le Haut-Atlas de la région de Midelt faisant partie de ce chapelet de cédraies privilégiées qui souligne d'ouest en est, sur presque toute la façade Haut-Atlantique ceinturant au sud la haute plaine de la Moulouya (fig. 3), le trajet des masses d'air océanique. Elle s'étend latéralement presque d'un bout à l'autre de l'ubac de ce chaînon. À l'inverse, son extension altitudinale n'est guère que de 100 à 150 m selon la topographie locale, mais présente la particularité de se maintenir presque sans discontinuer, à l'instar de toutes les cédraies de cette succession latitudinale, jusqu'à la *treeline* supérieure aux alentours de 2300 m.

Vue d'ensemble prise près de la piste qui relie le village de Tounfite à celui de Tikajjouine, à environ 3 km de ce dernier.

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 et DURRAN, 2004 ; HERTENSTEIN et KUETTNER, 2005.

L'effet de foehn ainsi créé, 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 6) 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





**Photo 5** – Vue détaillée de la treeline supérieure de la cédraie océanique à *Cotoneaster nummularia* du jbel Tawjjet -n- Ou Hajmou (la plus occidentale de toute la série de cédraies mentionnée ci-dessus qui prolonge vers l'ouest celle d'Owjjet -n- Sidi Lihamd (photo 4). Cette timberline 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 blocailleuse et faiblement terreuse constitué de blocs de grosseur variable, localement plus ou moins emballés dans un matériau argileux brun. Mais, d'une manière générale, le déterminisme écologique de ces cédraies est largement sous la dépendance de facteurs climatiques, le substrat jouant secondairement.

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 compacts. 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, déterminant 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 torrencialité 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 6). Toutefois, contrairement aux autres topoclimats, la présence de sols profonds et fertiles a donné lieu à d'importantes cultures irriguées aux dépens de la végétation naturelle.



**Photo 6** - Vue sur l'adret du jbel Tizal (3040 m) dans la vallée des Aït-Bou-Guemmez (Haut-Atlas) où l'on peut reconnaître quatre topoclimats : un de fond de vallée plat et trois autres plus ou moins pentus sur son versant sud (bas, moyen et haut versants). Les ruptures de pente indiquent leurs limites respectives.

Nature du topoclimat	Tranche altitudinale et altitude moyenne (m)	m (en °C)	T. max. (en °C)	T. min. (en °C)	T. moy. (en °C)	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 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).

## 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, 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 et BROLL (2010) ; mais l'action des vents violents peut aussi intervenir en tant qu'agents morphogènes de la structure de la végétation (NORTON et 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 et 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 (débourement, croissance, floraison, fructification), et tout particulièrement au moment du débourement 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 supraforestière, 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.

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 causse 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 7) au sud-est d'Ifrane (fig. 1). Sur le haut des versants, vers 2 000-2 300 m d'altitude, un niveau de cédraie à *Helianthemum croceum* relativement



thermophile, colonise des sols rendzini-formes superficiels. Plus bas, une thuriféraie à *Juniperus thurifera*, sur du matériel terro-pierro-rocheux est accompagnée de divers nanophanérophytes : *Berberis hispanica* et *Ribes atlantica*. En dessous de 2 150 m, les pieds de genévrier thurifère se raréfient très rapidement pour finalement disparaître vers 2 100 m, de sorte que l'étage inférieur en est dépourvu (photo 8). Toutefois, sur les fonds et bas de pente rocaillieux à bancs calcaires ou conglomérats encroûtés, s'établissent des essences caducifoliées rabougries et buissonnantes, plus rustiques, telles l'aubépine (*Crataegus laciniata*) et le frêne dimorphe (*Fraxinus dimorpha*). Cependant, ces dernières nanophanérophytes ne subsistent plus au col du Zad (2 178 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).



**Photo 7** - Vue sur le versant arboré exposé SE de la grande cuvette d'Aguelmame Sidi-Ali contrastant avec le fond asylvatique dans le Moyen-Atlas plissé.

Le genévrier thurifère est celui, parmi toutes les essences arborées marocaines, qui supporte le mieux le froid et peut résister à de longues périodes de gel. Mais, en dépit de cette rusticité, le froid excessif se conjugue à l'engorgement du substrat riche en terre fine, pour constituer le facteur limitant majeur à son développement sur les bas-fonds. Quant au cèdre de l'Atlas, représenté par un seul pied émondé au milieu du cliché, moins tolérant aux longues périodes de gel, il est relégué aux altitudes supérieures plus clémentes.

Sur les colluvions formées d'un mélange hétérogène de gélifrac-tes calcaires et d'argile brune prédominant des xérophytes épineux : *Bupleurum spinosum*, *Erinacea anthyllis* et *Cytisus purgans*, aux côtés de guirlandes de graminées hémicryptophytiques telles que *Koeleria vallesiana* qui colonise préférentiellement les bourrelets soliflués (une des formes caractéristiques liées aux processus périglaciaires).

En bas du cliché, à droite, un pied d'épine vinette au feuillage entièrement roussi, alors qu'un individu de genévrier thurifère présente encore un feuillage en partie resté vert.

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 *et 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 *et 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 *et al.*, 1988 ; VAN DER MAAREL, 1990 ; SLATYER et NOBLE, 1992 ; GOSZ, 1993 ; RISSER, 1995 ; HUFKENS *et 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 et HAMMERLY, 1985 ; ARQUILLIERE, 1986 ; DIDIER L. F., 1998 ; HOLTMEIJER, 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 *et al.*, 1998) pour des raisons, là aussi, écophysiologiques (LENZ, 1967 ; TRANQUILLINI, 1979 ; SLATYER et NOBLE, 1992).

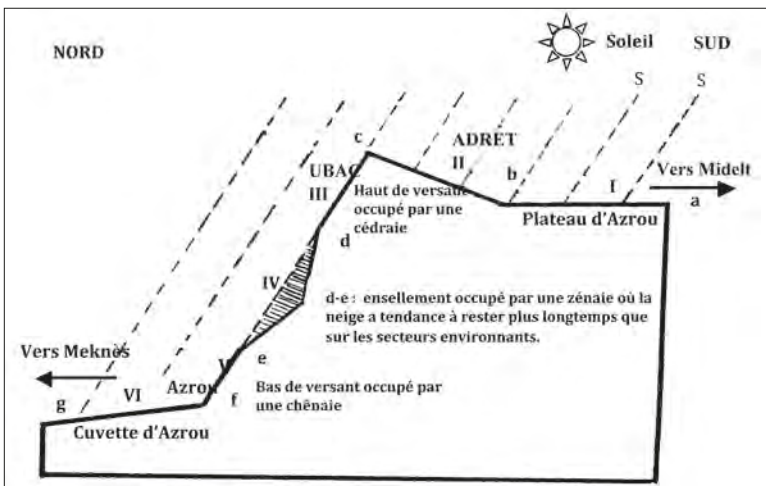
Par exemple, sur les chaînons du Haut-Atlas de la région de Midel (fig. 3), surplombant la maison forestière de Mitkane (photo 3), l'écotone arboré de la treeline supérieure formé par le cèdre de l'Atlas s'identifie avec la limite inférieure des neiges printanières de sorte que le topoclimat de haute 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 2 600 à 2 700 m qui reflète nettement des influences géomorphologiques. Elle est incisée vers le bas à chaque abrupt et grande échancrure qui entrecoupe le haut de versant. Les éboulis 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 celle 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.



**Figure 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.

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

**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.

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.

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 et dont la fonte plus ou moins tardive contribue, plus durablement, au maintien de l'humidité du sol (RHANEM, 2011).

#### IV - Conclusions

Milieux relativement peu anthropisés, les forêts du Moyen- et Haut-Atlas, en particulier celles de moyenne et haute altitude, sont riches d'une diversité d'essences adaptées à de multiples facettes topoclimatiques. 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. 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. 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. Cependant, si les résultats des mesures des éléments climatiques constituent la base de toute délimitation topoclimatique, ceux fondés sur les données empiriques de la distribution spatiale des facteurs influençant le climat à l'échelle locale n'en constituent 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.

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 permettaient de caractériser les topoclimats. Ainsi, très souvent les contrastes observés à l'échelle topoclimatique peuvent être rapidement décelés et 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.

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

- Sur le terrain, elle facilite le travail du cartographe ;
- Sur le plan scientifique, elle renseigne le phytoécologue sur les conditions édapho-topoclimatiques et le fonctionnement des écosystèmes ;
- 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 en 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

- ARNO S. F. et HAMMERLY R. P., 1985 - *Timberline mountain and arctic forest frontiers*. The Mountaineers, 304 p.
- ARQUILLIÈRE 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<sup>ème</sup> cycle, Université Joseph Fournier de Grenoble 1, 265 p.
- BAILEY R. G., 2009 - *Ecosystem geography : From ecoregions to sites*. Ed. Springer, 251 p.
- BARBERO M. & QUÉZEL 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. et 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. et SPURR S. H., 1998 - *Forest ecology*, 4 th.



- Edition, John Wiley & Sons, 774 p.
- BARRY R. G. & Van WIE C. C. 1974 - Topo- and microclimatology in alpine areas. In J. D. IVES and R. G. BARRY (eds). *Arctic and alpine environments*, p. 73-83, London, Methuen.
- BARRY R. G. 1992 - *Mountain weather and climate*. 2nd Ed., London and New York, Routledge, 402 p.
- 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. et COLOMBO S. J., 2001 - *Conifer cold Hardiness*. Kluwer Academic Publishers, 596 p.
- 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 wallone 39-40, pp. 7-15.
- BLONDEL J. et MÉDAIL F., 2009 - *Biodiversity and conservation*. In J. WOODWARD (Eds). « The physical geography of the Mediterranean », Oxford University Press, p. 615-650.
- BLONDEL J., ARONSON J., BODIOU J.-Y et BŒUF G., 2010 - *The mediterranean basin – biological diversity in space and time*. Oxford University Press, Oxford, 376 p.
- BÖHNER J. et ANTONIĆ O., 2009 - *Land-surface parameters specific to topo-climatology*. In T. HENGL et H. I. REUTER (eds). *Geomorphometry : Concepts, software, applications*, pp. 195-226, Developments in Soil Sciences, vol 33, Elsevier
- BOUET M., 1973 - Sur le rôle climatique du foehn. *Bull. Soc. Vaud. Nat.*, **342**, 72, 8 : 393-399.
- BOURNÉRIAS 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 geobiosphere*. 4th. Edition, Springer, 547 p.
- BRINKMAN W. A. R., 1971 - What is a foehn ? *Weather*, **26** : 230-239.
- BROWN J. H., STEVENS G. C. et 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** : 324-331.
- CARREGA P., 1994 - Topoclimatologie et habitat. Analyse spatiale quantitative et appliquée. *Rev. de Géogr. du lab. d'analyse spatiale Raoul Blanchard*, **35** et **36**. U.F.R. Espaces et cultures. Université de Nice-Sophia Antipolis, 408 p.
- 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, p. 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 p.
- CHOISNEL E., 1984 - Notions d'échelle en climatologie. *La Météorologie*, 7<sup>ème</sup> série, **4**, pp. 44-52.
- CHOISNEL E., 1987 - Aspects topoclimatiques : une méthodologie d'étude en région de moyenne montagne. *Agrométéorologie des régions de moyenne montagne*, Toulouse,



- 16-17 avril 1986, 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, 16-17 avril 1986, Ed. I.N.R.A., **39** : 37-49.
- CHOISNEL E. & JACQ V., 1987 - Une méthodologie d'étude des topoclimats. *Presse thermale et climatique*, **124(4)** : 188-196.
- COLWELL R. K., BREHN G., CARDELÚS C. L., GILMAN A. C. et 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., p. 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 Fourier de Grenoble 1, t. 1, 363 p. et t. 2, 313 p.
- 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, p. 644-650.
- DURRAN D. R., 1990 - Mountain waves and downslope winds. In Blumen W. (eds) Atmosphere processes over complex terrain. *Meteorological Monographs*, **23**, n° 45, American Meteorological Society : 59-81.
- EMEIS S. et KNOCH H. R., 2009 - Applications in Meteorology. In T. HENGL et H. I. REUTER (eds). *Geomorphometry : Concepts, software, applications*, p. 603-622, *Developments in Soil Sciences*, **33**, Elsevier.
- ESCOUROU G., 1981 - *Climat et environnement. Les facteurs locaux du climat*. Masson, coll. Géogr., Paris, 182 p.
- 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, 475 p.
- FARINA A., 2010 - *Ecology, cognition and landscape: Linking natural and social systems*. Springer, landscapes series, vol. 11, p. 1-169.
- FLAHAULT C., 1901 a - Les limites supérieures de la végétation forestière et les prairies pseudo-alpines en France. *Rev. Eaux et Forêts*, **25** : 385-401
- FLAHAULT 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, p. 139-171.
- FLOHN H., 1974 - Contribution to a comparative meteorology of mountain areas. In J. D. IVES and R. G. BARRY (eds). *Arctic and alpine environments*, p. 55-71, London, Methuen.

- 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, 567 p.
- GABERŠEK S. et DURRAN D. R., 2004 - Gap flows through idealized topography. Part I : Forcing by large-scale winds in the nonrotating limit. *J. At. Sc.*, **61** : 1846-1862.
- GAUQUELIN X., 2010 - *Guide de gestion des forêts en crise sanitaire*. IDF, 96 p.
- GÉHU J.-M. et GÉHU-FRANK J., 1986 - *Indices phytocoenotiques d'ancienneté des forêts*. Hommes et Terres du Nord, 2/3, p. 107-109.
- GEIGER M., 1980 - *Recherches topoclimatiques au Palatinat*. Recherches Géographiques à Strasbourg, 13-14, p. 95-102.
- GEIGER R., 1965 - *The climat near the ground*. Harvard Univ. Press., Cambridge, Massachusett, 611 p.
- GEIGER R., 1969 - *Topoclimates*. In Flohn H. (ed.), General Climatology, World Survey of Climatology 2, Elsevier, Amsterdam, p. 105-138.
- GEIGER R., ARON R. H. & TODHUNTER P., 2009 - *The climate near the ground*. Rowman & Littlefield Publishers, Inc, 7<sup>th</sup> ed., USA, 623 p.
- GERBIER N., 1965 - *Meteorology and the Desert locust*. F. A. O., Progres Report n° UNSF/DL/OP/5, 149 p.
- 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, 67 p.
- GOSZ J. R., 1993 - Ecotone hierarchies. *Ecological Applications*, **3,3** : 369-376.
- GRABHERR G., GOTTFRIED M. et PAULI H., 1994 - Climate effects on moutnain plants. *Nature*, **369** : 448.
- GRACE J., 1977 - *Plant Response to wind*. Academic Press, 204 p.
- 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, 63 p.
- GUREVITCH J., SCHEINER S. M. et FOX G. A., 2006 - *The ecology of plants*. Second Edition, Sinauer Associates, 574 p.
- GUYOT G., 1999 - *Climatologie de l'environnement. Cours et exercices corrigés*. Dunod, 2<sup>ème</sup> éd., 525 p.
- HANSEN A. J., DICASTRI F. et NAIMAN R., 1988 - *Ecotones : what and why ?* In A new look at ecotones : Emerging International Projects on Landscapes Boundaries. Edited by DICASTRI F., HANSEN A. J. and HOLLAND M. M., Biol. Int. Epec. Issue, 17, p. 9-46.
- HARTMANN G., NIENHAUS F., BUTIN H. et WINTER K., 1991 - *Les symptômes de dépérissement des arbres forestiers. Atlas de reconnaissance en couleurs des maladies, insectes et divers*. Edition française, IDF, 256 p.
- 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° spécial : 75-85.

- HOEKSTRA J. M., BOUCHERT T. M., RICKETTS T. H. et ROBERTS C., 2005 - Confronting a biome crisis: global disparities of habitat losds and protection. *Ecology Letters*, **8** : 23-29.
- HOLTMEIER F.-K., 2009 - Mountain timberlines. Ecology, Patchiness, and Dynamics. *Advances in Global Change Research*, **36**, Springer, 437 p.
- HOLTMEIER F.-K. et BROLL G., 2010 - Wind as an ecological agent at treelines in North America, the Alps, and the European Subarctic. *Physical Geography*, **31**, 3 : 203-233.
- HOWARD J. A. et MITCHELL C. W., 1985 - *Phytogeomorphology*. Ed. John Wiley & Sons, 222 p.
- HUFKENS K., SCHEUNDERS P. et 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, Freiburg (R.F.A.), 20-21 février, 1986, p. 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, 540 p.
- 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., et MILLER H. L. (eds), Cambridge University Press, 996 p.
- IZARD M., CASANOVA H., DEVAU B. et 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 I. L. HUDSON et M. KEAYLY (eds). Phenological Research : Methods for Environmental and climate change analysis, p. 159-175, Springer, 522 p.
- KAREIVA P., TAILLIS H., RICKETTS T. H., DAILY G. C. et POLASKY S., 2011 - *Natural Capital : Theory and practice of Mapping Ecosystem Services*. Oxford University Press, 365 p.
- KÖRNER C., 2007 - The use of 'altitude' in ecological research. *Trends in Ecology and Evolution*, **22**,11 : 569-574.
- KÖRNER C. et PAULSEN J., 2004 - A world-wide study of high altitude treeline temperatures. *Journal of Biogeography*, **31** : 713-732.
- KRUCKBERG A. R., 2002 - *Geology and plant life. The effects of landforms and rock types on plants*. University of Washington Press, Seattle, 362 p.
- KUETTNER J. 1959. *The rotor flow in the lee of mountains*. GRD Research Note 6, Air Force Cambridge Research Laboratories, 20 p.
- 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, 278 p.
- LESTER P. F., 2007 - *Aviation weather*. Englewood, third ed., Jeppesen, 466 p.
- LE TACON F., SELOSSE M.-A et 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 et 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 S.-W. BRECKLE *et al.* (eds), *Arid due ecosystems*, p. 175-182. *Ecological Studies*, 200, Springer-Verlag.
- LOMOLINO M. V., RIDDLE B. R., WHITTAKER R. J. et BROWN J. H., 2010 - *Biogeography*. Fourth Edition, Sinauer Associates, 878 p.
- MACHATTIE L. B. & SCHNELLE F., 1974 - *An introduction to agrotopoclimatology*. Technical note WMO, n° 133, 131 p.
- 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, 402 p.
- MAZZOLENI S., DI PASCALE G., DI MARTINO P., REGO F. et MULLIGAN M. (eds), 2004 - Recent dynamics of Mediterranean vegetation and landscape. John Wiley and Sons, 306 p.
- MÉDAIL F. et QUÉZEL P., 1997 - Hot-spots analysis for conservation of plant biodiversity in the mediterranean bassin. *Ann. Missouri Bot. Gard.*, **84** : 112-127.
- NAGELEISEN L.-M., PIOU D., SAINTONGE F.-X. et RIOU-NIVERT P., 2010 - *La santé des forêts. Maladies, insectes, accidents climatiques...Diagnostic et prévention*. DSF/IDF, 608 p.
- NÈGRE R., 1982 - Climax : utopie ou réalité. *C. R. Soc. Biol.*, **58**, 3 : 99-110.
- NORTON D. A. et SCHÖNENBERGER W., 1984 - The growth forms and ecology of *Nothofagus solandri* at the alpine timberline, Craigieburn range, New Zealand. *Arctic and Alpine Research*, **16**, 3 : 361-370.
- OZENDA P., 2002 - *Perspectives pour une géobiologie des montagnes*. Presses Polytechniques et universitaires Romandes, 159 p.
- PARCEVAUX (de) S. & HUBER L., 2007 - *Bioclimatologie. Concepts et applications*. Éd. Quae, Versailles, 324 p
- PAUL P., 1980 - Topoclimats thermiques dans le vallon du Ringelbach. *Recherches Géographiques à Strasbourg*, **13-14** : 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, p. 197-226.
- PÉGUY 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*. 2nd ed., The Johns Hopkins University Press, Baltimore, 606 p.
- 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, 177 p.
- PIGOTT C.D. et PIGOTT S., 1993 - Water as a determinant of the distribution of trees at the boundary of the Mediterranean zone. *Journal of Ecology*, **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. et HECTOR A., 2000 - Getting the measure of biodiversity. *Nature*, **405**, 6783 : 212-219.
- QUÉZEL P. et BARBERO M., 1982 - Definition and characterization of Mediterranean-

- type ecosystems. *Ecologia Mediterranea*, **8**, 1/2 : 15-29.
- QUÉZEL P. et MÉDAIL F. 2003. Que faut-il entendre par « forêts méditerranéennes » ? *Forêt méditerranéenne*, **24**, 1 : 11-31.
- RAIMONDO F. M. et VALDÉS B. (ed.), 1998 - Catalogue des plantes vasculaires rares, menacées ou endémiques du Maroc. Herbarium Mediterraneum Panormitanum, Palermo, *Boccone*, **8** : 1-252.
- 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 wallonne*, **39-40** : 37-51.
- RAMPANELLI G., ZARDI D. et ROTUNNO R., 2004 - Mechanisms of Up-Valley Winds. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **61** : 3097-3111.
- REID W. V., 1998 - Biodiversity hotspots. *Tree*, **13** : 275-280.
- RHANEM M., 1985 - *Étude phyto-écologique des versants de la vallée des Aït Bou Guemmez (Haut-Atlas central septentrional, Maroc)*. Th. Doct. 3<sup>ème</sup> cycle, Univ. Sc. Tech. Languedoc, Montpellier, 114 p + 3 cartes 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). *Flora Mediterranea*, **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*, vol. III, p. 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.
- RISSER 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*. Paris, Armand Colin, 221 p.
- SAINTONGE F.-X., NAGELEISEN L.-M., ASSALI F. et AADEL T., 2011 - Santé 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.

- SCHULTZ J., 2004 - *The ecozones of the world : Ecological divisions of the geosphere*. Second Edition, Springer-Verlag, 252 p.
- SEIGUE A., 1985 - *La forêt circumméditerranéenne et ses problèmes*. Éd. Maisonneuve et Larose, Paris, 502 p.
- SINCLAIR W. A. et LYON H. H., 2005 - *Diseases of trees and shrubs*. Second Edition, Cornell University Press, 660 p.
- SLATYER R. O. et NOBLE I. R., 1992 - *Dynamics of Montane treelines*. In HANSEN A. J. et DI CASTRI F. (eds), *Landscapes boundaries. Consequences for biotic diversity and ecological flows*, Springer-Verlag, p. 346-359.
- SMITH R. B., 1989 - Hydrostatic airflow over mountains. *Advances in Geophysics*, **31** : 1-41.
- STEINER F., 2008 - *The living landscape : An ecological approach to landscape planning*. Ed. Island Press, Second Ed. , 470 p.
- STULL R., 1988 - *An introduction to boundary layer meteorology*. Kluwer Academic Publishers, 666 p.
- THILLET J.-J. et SCHUELLER D., 2009 - *Petit manuel de météo de montagne*. Grenoble, Ed. Glénat, 192 p.
- THOMPSON J. D., 2005 - *Plant evolution in the Mediterranean*. Oxford University Press, 293 p.
- THORNTHWAITE C. W., 1954 - *Topoclimatology*. Proceedings Toronto Meteorological Conference, 1953. Royal Meteorological Society, London, p. 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**, 137 p.
- TUHKANEN S., 1980 - Climatic parameters and indices in plant geography. *Acta Phytogeographica Suecica*, **67** : 1-105.
- VAN DER MAAREL E., 1990 - Ecotones and ecoclines are different. *Journal of Vegetation Science*, **1** : 135-138.
- VERGEINER I. et DREISEITL E., 1987 - 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. (eds) *Atmosphere processes over complex terrain. Meteorological Monographs*, **23**, n° 45, American Meteorological Society : 5-42.
- WHITEMAN C. D., 2000 - *Mountain meteorology. Fundamentals and applications*. New York, Oxford University Press, 355 p.
- WHITEMAN C. D. et 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 Institutue. Battelle, 176 p.
- WOODWARD F. I., 1987 - *Climate and plant distribution*. Cambridge University Press, 188 p.
- YOSHINO M. M., 1973 - Wind-shaped trees in the subalpine zone in Japan. *Arctic and Alpine Research*, **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.