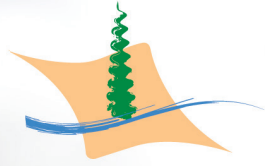
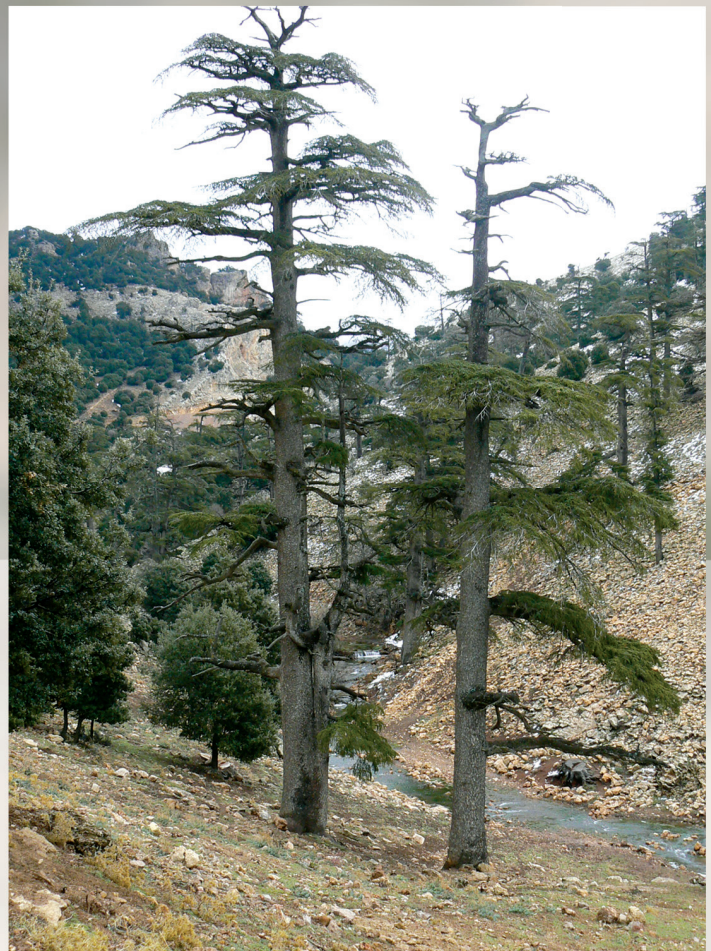


Royaume du Maroc



Haut Commissariat aux Eaux et Forêts
et à la Lutte Contre la Désertification

ETUDE DES CAUSES DE DÉPÉRISSEMENT DE LA CÉDRAIE DU MOYEN ATLAS





PREFACE

La majesté du cèdre, l'architecture de ses branches et sa silhouette tabulaire, sa diversité écobio-écologique, mais aussi sa longévité, font de cet arbre l'essence la plus noble et la plus imposante de la forêt marocaine. Colonisant les hautes montagnes de 1500 à 2400 mètres d'altitude, on le rencontre dans le Rif au-dessus de 1400 mètres d'altitude sur les versants atlantiques et dans les montagnes du Moyen-Atlas central (Azrou- Itzer) et le Haut-Atlas oriental (Ayachi-Masker).

Véritable mémoire du temps, le cèdre nous livre une longue histoire du climat, en restituant avec précision ses fluctuations durant tout un millénaire. Il inscrit dans sa "propre chair" la succession des périodes sèches et humides et indique par là même les périodes de fastes et d'épreuves que le climat et ses variations engendre et partant les impacts sur la vie des citoyens notamment dans les espaces ruraux. Gravé, sculpté ou peint, le cèdre accompagne les plus belles œuvres de l'architecture, particulièrement à Fès, Meknès et Marrakech.

Grâce à sa faculté d'adaptation dans des conditions difficiles, sa longévité, son puissant enracinement fixateur des sols, sa résistance aux incendies, sa valeur esthétique, son bois pratiquement imputrescible d'une grande valeur pour la construction et la menuiserie, le cèdre s'impose dans cette multifonctionnalité pour être au cœur de l'équilibre de l'écosystème cédraie.

Aussi, les dysfonctionnements constatés dans les peuplements de cèdre, exprimés à travers des manifestations de dépérissement sporadiques constatés dès le début des années 1990 ont constitué une grande préoccupation pour les responsables forestiers. L'appréhension de ce phénomène ne pouvait s'accommoder des solutions linéaires découplées des données écologiques, forcément inefficace et sans portée réelle sur la restauration structurelle des équilibres. Ce dépérissement qui amplifie la vulnérabilité de l'écosystème cédraie est l'expression de phénomènes aux causalités multiples et interdépendantes qui s'auto-entretiennent et dont la complexité appelle une approche interdisciplinaire fondée sur la lecture rigoureuse des constats et leur analyse causale.

C'est à cette tâche que s'est attaché le Haut Commissariat aux Eaux et Forêts et à la Lutte Contre la Désertification (HCEFLCD), s'appuyant sur les meilleures expertises disponibles, avec l'ambition d'inverser les tendances. De ces connaissances des mécanismes complexes du dépérissement conduisant à une meilleure compréhension de la dynamique de l'écosystème, émanent les politiques de réhabilitation. Cette complexité, a pour corollaire la mise en place d'une approche territoriale s'adressant aux spécificités de chaque écosystème. A cette approche spatiale correspond une intégration de programmes où le reboisement constitue un élément central, mais non unique qui est conduit dans un contexte et avec un cortège de mesures appropriées.

Docteur Abdeladim Lhafi

*Haut Commissaire aux Eaux et Forêts
et à la Lutte Contre la Désertification*



PREAMBULE

La complexité du phénomène de dépérissement et de dysfonctionnement des peuplements du cèdre dans le Moyen Atlas marocain a conduit au choix d'une approche holistique intégrée et interdisciplinaire (*Chapitre 1*) permettant d'appréhender le lien des causes et des symptômes pouvant expliquer le phénomène de dépérissement observé dans la région et définir une stratégie de gestion et de protection de la cédraie sous forme d'outils de gestion à court, à moyen et à long terme.

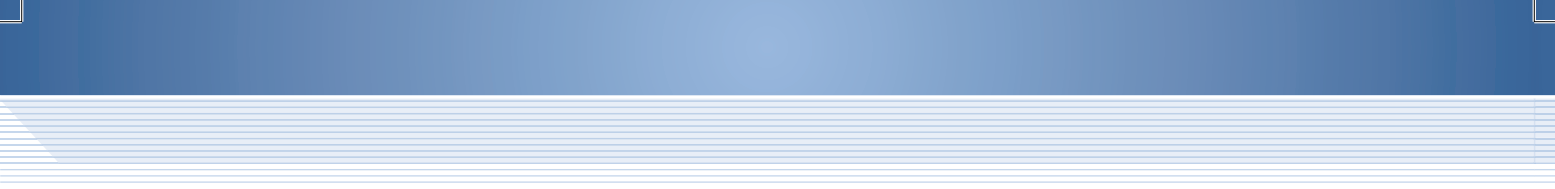
L'approche adoptée dans cette étude (*Chapitre 2*) envisage l'intégration de plusieurs facteurs ayant trait aux caractéristiques physiques du sol, aux conditions trophiques et hydriques, dendrométriques, éco-physiologiques, phytosanitaires ainsi qu'aux caractéristiques sylvicoles. Il est, certes, difficile de déterminer sur le terrain le rôle propre de chaque facteur, car c'est en réalité la résultante d'une action combinée de plusieurs d'entre eux qui influe probablement sur la vigueur et la vitalité des arbres.

A cet effet, les données nécessaires sont collectées par thématique mise en jeu selon un protocole unifié d'échantillonnage. Ce protocole, repose sur un type d'échantillonnage aléatoire simple probabiliste avec un échantillon de 54 placettes matérialisées dans la zone d'étude. Il constitue, ainsi, une plate-forme de collecte et d'analyse à travers laquelle sont recherchées les relations explicatives entre la santé du cèdre (structure à intérêt direct) et les divers facteurs explicatifs (effets directs ou produits d'interaction) relevant de toutes les disciplines concernées et le support de base pour l'élaboration de la méthodologie de l'étude.

Le présent rapport est conçu et élaboré sur la base de l'ensemble des études relatives aux différentes composantes disciplinaires de l'étude (*Chapitre 3*). Il constitue une synthèse qui essaie de respecter une homogénéité de contenu ou de substrat du texte «principe de pertinence des linguistes : ne retenir dans une masse de données que ceux qui se rapportent à un seul point de vue», le nôtre étant les causes du dépérissement du cèdre, et une homogénéité de texture atteinte par une simplification de la complexité des analyses thématiques avec une perte minimale d'information.

Quant à l'exhaustivité qui «stipule que toutes les situations ou tous les aspects d'un phénomène soient représentés», elle correspond, dans le cadre de cette synthèse, à la probabilité de recouvrir, à travers un protocole d'échantillonnage approprié, l'ensemble des facteurs de variation pouvant agir sur les relations «état de santé des forêts de cèdre de l'Atlas – milieu biotique et abiotique – sylviculture».

Après avoir rappelé le contexte général de l'étude, le rapport présente, dans les chapitres qui suivent, un résumé de la méthodologie globale adoptée ainsi que des résultats des études thématiques pour chacune des composantes : bioclimatologie et dendrochronologie, écophysiologie, sol et nutrition minérale des arbres, entomologie, inventaire dendrométrique et phytosanitaire, aménagement forestier et guides de sylviculture et analyse des données, SIG et base de données.



La dernière partie développe des synthèses axées sur la structuration et l'analyse multidimensionnelle de l'ensemble des données récoltées. Ces synthèses (*Chapitres 4 et 5*) ont permis de mieux appréhender les liens de causalité pouvant expliquer le phénomène de dépérissement et d'élaborer, en conséquence, un certain nombre d'outils nécessaires pour la mise en œuvre de stratégies d'intervention à court, moyen et long terme, en particulier: (i) la typologie de l'état phytosanitaire du cèdre; (ii) la carte des densités et (iii) la carte de sensibilité du cèdre au dépérissement. Ces synthèses ont abouti à la proposition d'un programme à court, moyen et long terme.

Ce programme (*Chapitres 6, 7 et 8*) est décliné en plans opérationnels et en guides d'orientation à moyen terme (durée d'application de l'aménagement des forêts étudiées) pour les gestionnaires forestiers (guide de sylviculture), qu'il s'agisse de plans d'aménagement ou d'exploitation, des opérations sylvicoles, du choix du mode d'opération en matière de régénération, de reboisement ou d'actions sylvo-pastorales ou encore de surveillance de l'état sanitaire des forêts. Les guides de sylviculture sont élaborés au niveau de chaque forêt.

De même un programme d'urgence à court terme (5 ans), qui mobilisera les moyens humains et matériels appropriés, est proposé.

1. Contexte général de l'étude

1.1 Le dépérissement du cèdre dans le Moyen Atlas: un problème préoccupant

Les peuplements de cèdre occupent, au Maroc, environ 133.000 ha, répartis dans le Moyen Atlas, le Haut Atlas Oriental, le Rif et le Massif de Tazekka. Le cèdre est traditionnellement l'essence noble du pays et un élément constitutif d'identité collective qui remplit une véritable fonction patrimoniale, Au-delà de sa fonction économique et de la production d'un bois noble et d'une gamme de produits forestiers non ligneux, le manteau forestier du cèdre constitue en l'état actuel, le meilleur garant de la fonction de château d'eau du Moyen Atlas pour le pays tout en assurant la protection des infrastructures et la sécurité des piedmonts où se concentre l'activité humaine.

De même, la diversité des sites, des habitats et des paysages des forêts de cèdre a favorisé, depuis longtemps, le développement d'activités de loisirs et de détente, voire d'écotourisme. Ces zones continueront à être privilégiées en été comme en hiver pour les différents types de loisirs.

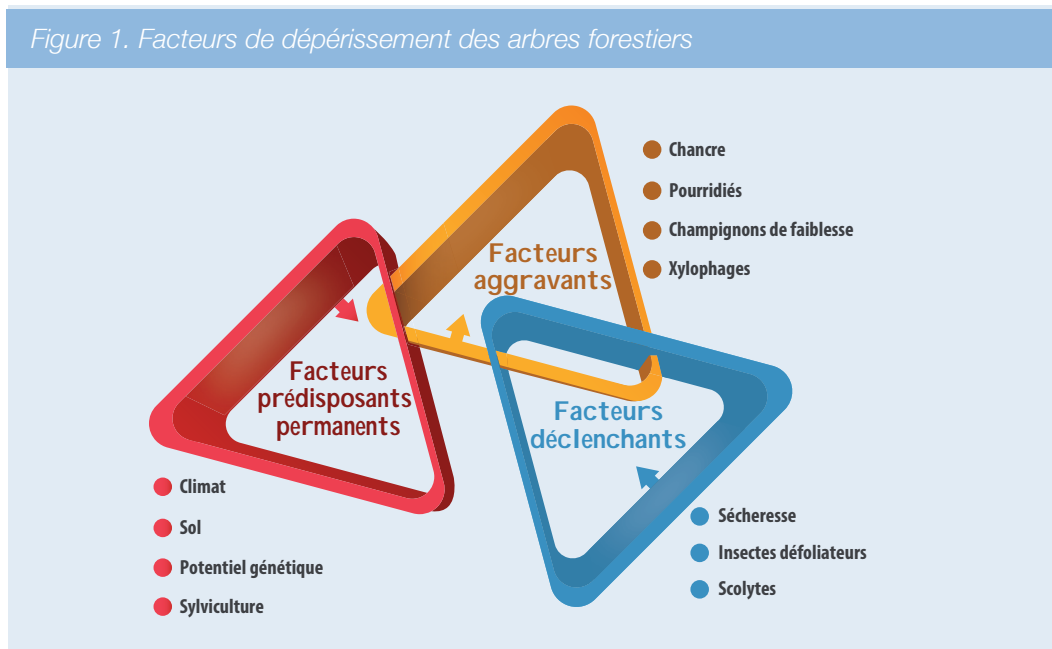
Le cèdre de l'Atlas est une richesse économique, un bien social et un patrimoine dont l'importance s'impose. Cependant, de graves menaces sont perceptibles dans son écosystème. L'état actuel de santé des cédraies du Moyen Atlas est très préoccupant. Des milliers d'hectares de cette essence sont dépéris et d'autres en voie de dépérissement. Des mortalités importantes sont en général constatées laissant planer de nombreuses interrogations sur l'avenir de cet écosystème.

Les prospections périodiques sur les lieux par les gestionnaires forestiers, les chercheurs et les autorités locales ont confirmé la gravité du problème de mortalité du cèdre et ont convenu de l'urgence de s'attaquer à ce phénomène. Néanmoins, les actions entreprises dans ce domaine se limitent à des coupes d'assainissement de bois mort ou à des investigations à caractère pronostic, ponctuel et sectoriel.

1.2 Concept et objectifs de l'étude: Une approche globale pluridisciplinaire

Le dépérissement des forêts est un phénomène complexe dont les causes multiples ne sont pas aisément identifiables et hiérarchisables a priori. Leur origine est à rechercher dans l'action de plusieurs facteurs biotiques, écologiques ou anthropozoïques interagissant et se succédant d'une façon particulière, et entraînant une détérioration générale qui se termine souvent par la mort des arbres. D'une manière générale, trois niveaux de facteurs, en partie interchangeables (*figure 1*), interviennent: les facteurs prédisposants (changements climatiques à long terme, pollution chronique, réduction de vigueur liée à l'âge...) contribuent à l'affaiblissement général des arbres; les facteurs déclenchants (sécheresse, insectes défoliateurs...) agissent de façon intense sur une période relativement courte et les facteurs aggravants (champignons, insectes...) accentuent la perturbation.

La complexité du phénomène de dépérissement et de dysfonctionnement des peuplements du cèdre dans le Moyen Atlas exige une approche holistique intégrée et interdisciplinaire permettant d'appréhender pour mieux comprendre la problématique et structurer les informations pour mieux synthétiser et agir dans la perspective d'élaboration d'un programme d'action global. Le caractère multidimensionnel des phénomènes liés à la santé des forêts justifie ainsi cette approche et, par conséquent, l'implication de divers spécialistes afin de comprendre et caractériser la structure et le fonctionnement de l'écosystème «cédraie» et par la même, cerner les causes de dépérissements de ces forêts.



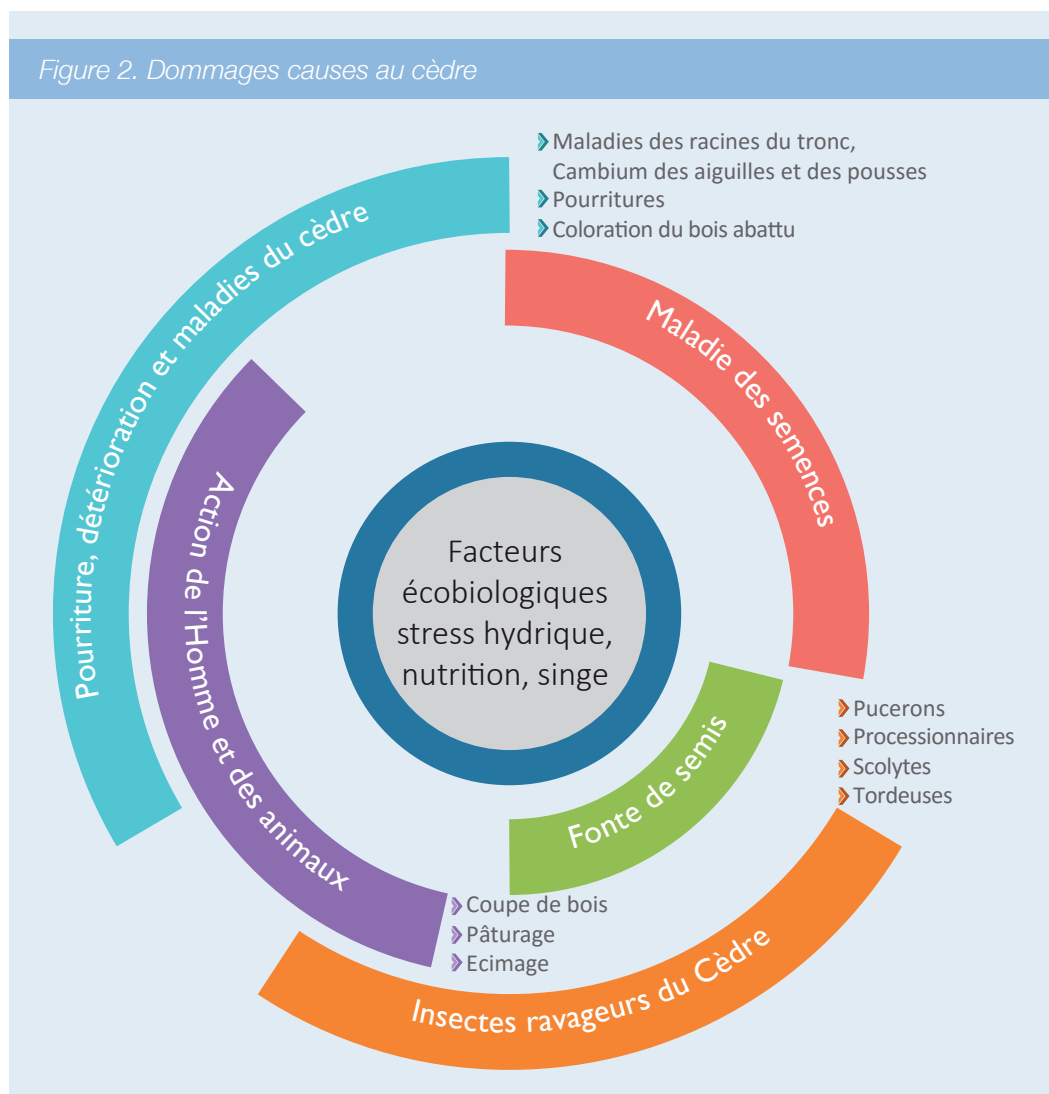
C'est dans ce cadre que le projet «**Etude des causes du dépérissement de la cédraie du Moyen-Atlas**» a été élaboré par le HCEFLCD, avec l'assistance de la FAO, dans le cadre général de la «Convention FAO/UTF/MOR/028/MOR : Appui à la mise en œuvre du Programme Forestier National».

Les principaux objectifs des investigations pluridisciplinaires, prévues dans le cadre de ce projet, consistent à caractériser le lien des causes et des symptômes pouvant expliquer le phénomène de dépérissement observé dans la région et définir une stratégie de gestion et de protection de la cédraie sous forme d'outils de gestion à court, à moyen et à long terme.

Pour ce faire, les thématiques identifiées, eu égard à l'état des connaissances sur les dommages causés au cèdre et les agents causaux de ces dommages (*figure 2*), concernent un certain nombre d'analyses et de diagnostics en rapport avec la bioclimatologie, la dendrochronologie, l'écophysiologie les sciences du sol, l'entomologie, la phytopathologie,...

Elles impliquent aussi l'utilisation d'outils d'investigation performants, en particulier la théorie de l'échantillonnage, les méthodes d'analyse biométrique multidimensionnelles, les méthodes de gestion de base de données et de systèmes d'information géographique pour la spatialisation des phénomènes. La thématique de l'inventaire et aménagement forestier devrait permettre, à partir de ces analyses, d'établir des directives d'aménagement et de sylviculture à suivre pour remédier dans le court, moyen et long terme à ce genre de dysfonctionnement des peuplements de cèdre.

Figure 2. Dommages causés au cèdre

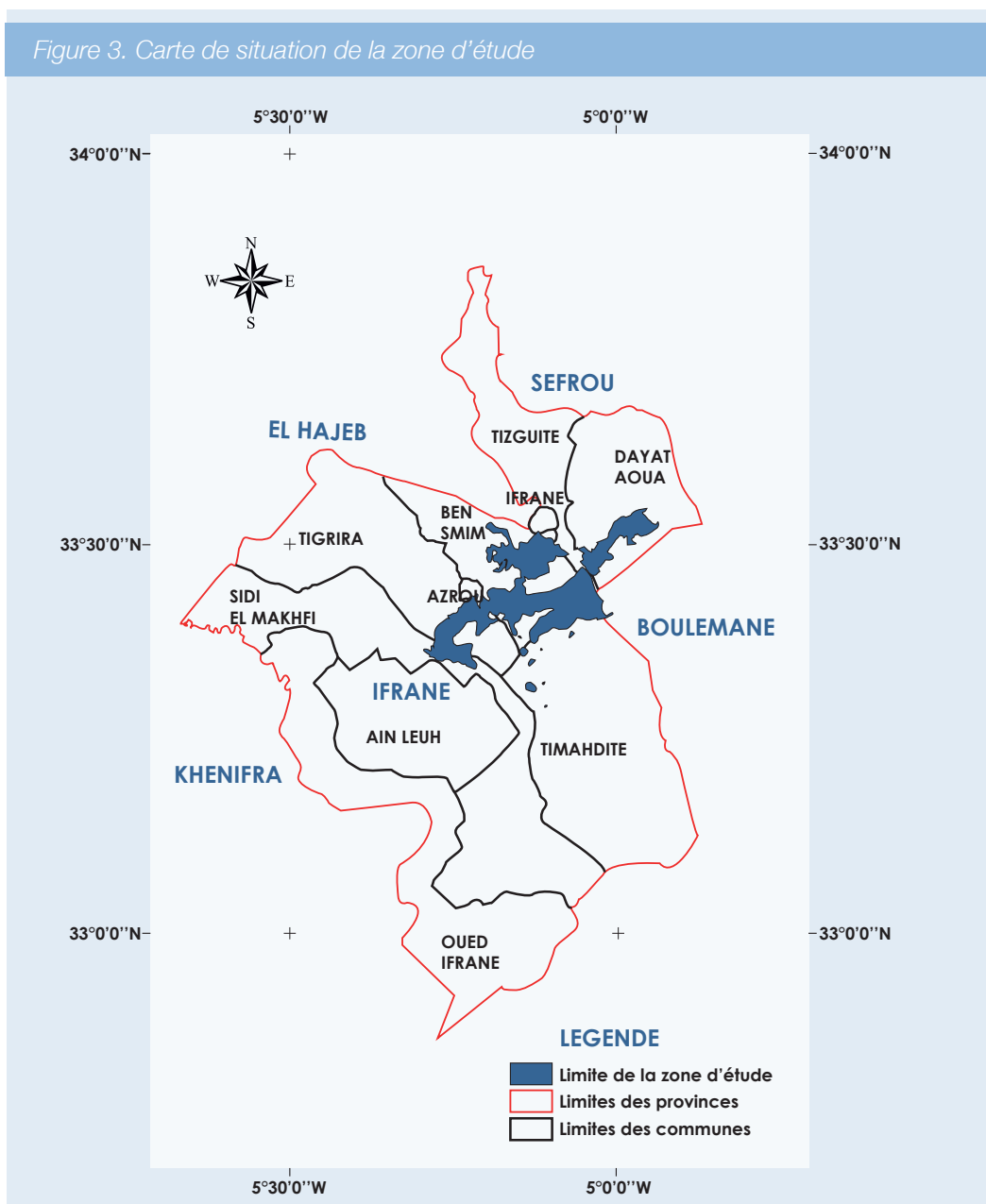


La complexité et l'importance des champs disciplinaires mis en jeu ont nécessité la mise en place d'une coordination pour veiller à l'interdisciplinarité et à l'approche holistique requise et garantir le succès du projet. Pour ce faire, les coordonnateurs national et international, ainsi que neuf experts consultants nationaux ont été recrutés conformément aux termes de référence de l'étude.

1.3 Zone d'étude : la forêt d'Azrou, échantillon représentatif de la cédraie du Moyen Atlas

La zone concernée par le projet, d'une superficie de 20.940 ha, est constituée de deux massifs forestiers : la forêt d'Azrou et la forêt d'Ait Youssi Amekla qui relèvent du Service Forestier d'Ifrane relevant lui-même de la Direction Régionale des Eaux et Forêts et de la Lutte Contre la Désertification du Moyen-Atlas (DREFLCDMA). La figure 3 illustre la localisation de la zone d'étude.

Figure 3. Carte de situation de la zone d'étude



La forêt domaniale d'Azrou s'étend sur la bordure nord du plateau du Moyen Atlas sur une superficie totale de 17.810 ha, dont une superficie boisée de 13.763 ha et 4.044 ha constitués par des clairières. Elle se caractérise par un relief contrasté avec des altitudes très variables où l'on observe souvent des inversions de l'étagement altitudinal de la végétation (cas de Michlifen et de Jbel Habri).

Le cèdre, dans cette forêt, représente l'essence principale et forme des peuplements purs ou en mélange avec le chêne vert, le chêne-zeen et des essences secondaires selon la nature du substrat. Les peuplements de cèdre purs et en mélange occupent une superficie totale de 8.680 ha représentant 48% de la superficie totale de la forêt; les peuplements de chêne vert s'étendent sur une superficie totale de 4.420 ha, soit 25% de la forêt. La forêt est divisée en 122 parcelles réparties entre plusieurs unités de gestion forestière et communes rurales.

Le tableau 1 ci-après donne la consistance de ces forêts.

Tableau 1. Consistance des forêts de la zone d'étude			
Forêt	Commune rurale	Surface (ha)	%
Azrou	Ben Smim	9.469,63	53,18
	Tigrigra	3.684,38	20,69
	Timahdit	3.522,58	19,78
	Sidi El Makhfi	1.130,20	6,35
Total partiel		17 806,79	85
Aït Youssi de l'Amekla	Dayat Aoua	3 133,09	15
Total général		20939,88	100

La forêt domaniale d'Aït Youssi Amekla a une contenance de 5.740 ha. La partie concernée par la zone d'étude, d'une superficie de 3.133 ha, est limitée au Canton Lalla Mimouna correspondant au triage forestier de Dayet Hachlaf (District forestier de Dayet Aoua).

Le peuplement de la forêt d'Aït Youssi est constitué principalement de cèdre et de chêne vert en association avec d'autres essences secondaires telles que les genévriers, le houx, l'érable, l'if et le frêne formant des bouquets dispersés. Le peuplement de cèdre pur ou en mélange occupe une superficie totale de 3.113 ha représentant 55 % de la superficie totale de la forêt. Quant au chêne vert pur, il occupe une superficie de 1.384 ha, soit 25 % de la superficie de la forêt, et se présente à l'état de taillis adulte dense.

Les travaux de l'étude se sont déroulés pendant 36 mois, (mai 2005 - mai 2008) selon quatre phases réparties :

Tableau 2. Phases de déroulement des activités			
Phases	Durée	Objectifs	Observations
Phase I (mai - oct. 2005)	4 mois	Elaboration d'un plan unifié d'échantillonnage valable pour l'ensemble de l'étude.	Atelier de concertation et discussion des résultats et validation du plan unifié d'échantillonnage.
Phase II (nov. 2005 - fév. 2006)	3 mois	Elaboration de la méthodologie globale de l'étude, note méthodologique thématique, précise et détaillée par domaine d'intervention.	Atelier spécifique: synthèse des notes méthodologiques thématiques, présentation et validation
Phase III (Sept. 2006 - août 2007)	12 mois	Réalisation des travaux thématiques, élaboration de rapports et base de données SIG.	Atelier de concertation : présentation des rapports thématiques et validation.
Phase IV (mars - mai 2008)	3 mois	Synthèse des travaux thématiques et proposition d'un programme d'action global.	Atelier de restitution : présentation et validation du rapport de synthèse.

2. Méthodologie globale de l'étude

2.1. Choix d'un protocole d'échantillonnage

Pour la problématique étudiée du dépérissement du cèdre, l'implication d'une infinité de facteurs écologiques relevant de plusieurs disciplines, la difficulté de cerner leurs échelles d'activités, leurs pouvoirs de discrimination ainsi que les produits de leurs interactions, orientent les investigations méthodologiques vers une approche holistique multidisciplinaire. A cet effet, le choix d'un protocole d'échantillonnage unifié constitue une plate-forme de collecte et d'analyse des données et la base pour l'élaboration de la méthodologie des analyses thématiques.

L'élaboration du protocole unifié d'échantillonnage est réalisée en plusieurs étapes :

- ⊙ Dépouillement des données cartographiques et bibliographiques.
- ⊙ Tournées de prospection sur le terrain avec le service forestier.
- ⊙ Cartographie du dépérissement et contrôle systématique sur le terrain.
- ⊙ Enseignements préliminaires et émission d'hypothèses.
- ⊙ Inventaire préliminaire.
- ⊙ Analyse des données et éléments de décision pour l'élaboration du protocole.

La prospection a permis d'approfondir les investigations afin d'identifier, de décrire et de cartographier les cédraies dépérissantes et de cerner les facteurs apparents et potentiellement explicatifs des mortalités observées. Les premières investigations et appréhensions sur cet écosystème permettent de tirer quelques renseignements et d'émettre quelques hypothèses à trois niveaux de perception:

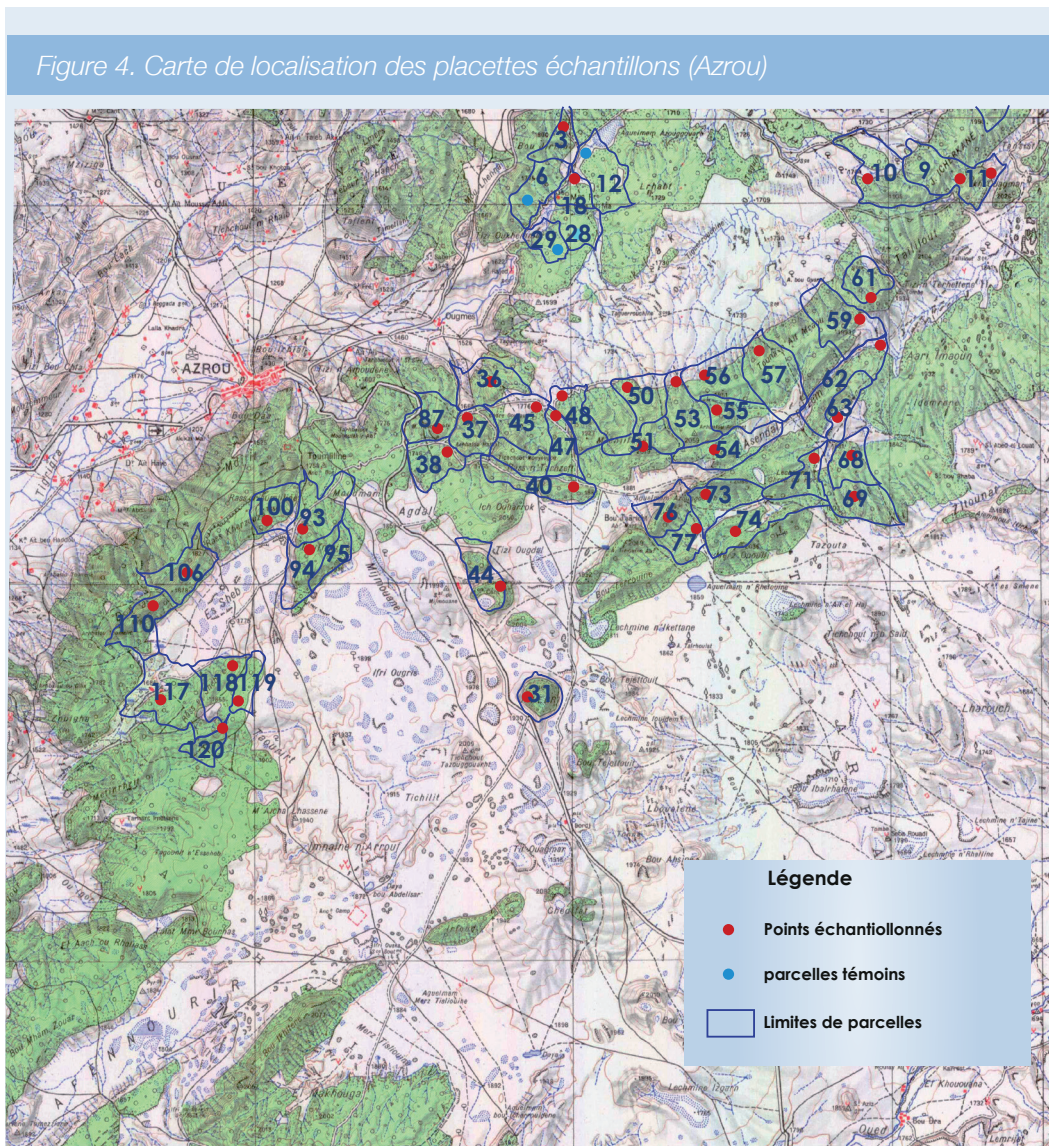
- ⊙ **Au niveau structural** : la végétation dans la zone est constituée essentiellement du cèdre et du chêne vert relativement dense. Les dépérissements touchent, en général, toutes les classes de diamètres et toutes les classes d'âge du cèdre.
- ⊙ **Au niveau dépérissement** : on distingue des dépérissements anciens, des dépérissements récents et des dépérissements déclenchés. Ils se manifestent en général d'une manière disparate soit par individus ou par bouquets et très rarement d'une manière massive.
- ⊙ **Au niveau écologique** : les dépérissements ne semblent a priori être régis, d'une manière significative ou du moins apparente, par un facteur particulier; des mortalités dans différentes classes d'âge sont observées quelle que soit l'exposition, la pente, la position topographique ou le substrat.

A ce stade, une carte des peuplements dépérissant a été élaborée au 1/50.000 et des placettes représentatives ont été localisées pour servir d'unités d'échantillonnage pour l'inventaire préliminaire. Cet inventaire a permis de caractériser la population étudiée; identifier des éléments de décision pour asseoir le protocole d'échantillonnage; déterminer la taille de l'échantillon capable de donner une image fidèle de la population et apprécier les tendances de structure et de fonctionnement du système. Il a fait l'objet d'une organisation minutieuse et d'une formation ciblée des techniciens de la zone d'étude pour mieux les préparer à la réalisation des inventaires et au suivi phytosanitaire des peuplements.

Les résultats de l'inventaire préliminaire ont permis de préciser les paramètres considérés comme pertinents en rapport avec les objectifs de l'étude, en particulier: la densité des arbres vifs; la densité des arbres morts; la lithologie, l'exposition et la position topographique, et de déterminer les éléments de décision du protocole unifié d'échardonnage proposé pour l'étude à savoir:

- ⊙ La taille de l'échantillon (*nombre d'unités de sondage*).
- ⊙ La taille des unités d'échantillonnage.
- ⊙ Le mode d'échantillonnage.
- ⊙ La localisation de ces unités dans l'espace, objet de l'étude.

Ainsi, le protocole proposé repose sur un type d'échantillonnage aléatoire simple probabiliste avec un échantillon de 54 placettes dont deux placettes témoins contenant des peuplements sains. L'ensemble des placettes est positionné sur la carte topographique au 1/50.000 (*figure 4*).

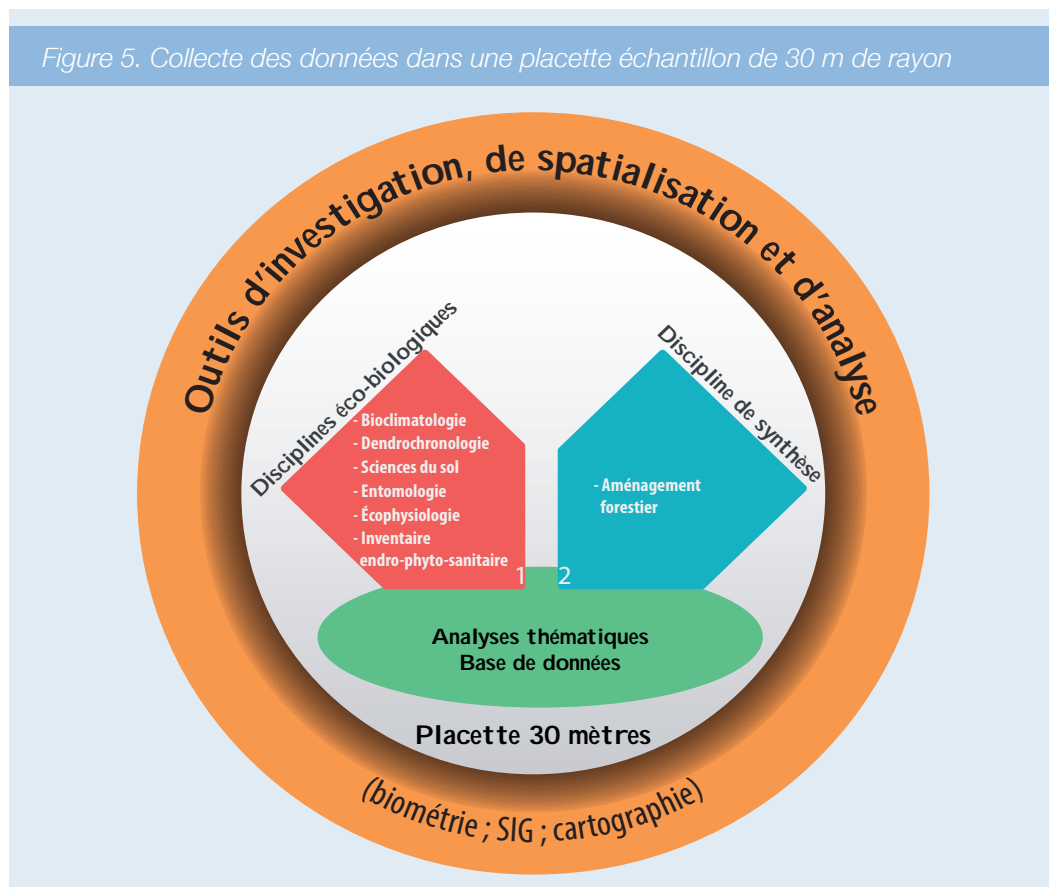


Le tableau 3 donne la répartition des placettes par unité territoriale de gestion.

Tableau 3. Répartition définitive des placettes de mesure par site de sondage				
Site		N° des parcelles choisies pour l'étude	Témoins	Effectif
1	Ras Elma Nord	3-18	6-12	04
2	Ras Elma Sud	36-37-38-40-44-45-47-48-50-51	28-29	12
3	Azrou	74-77-81-87-93-95-120-117-119-94-100		11
4	Boutrouba	54-55-56-57-62-61-68-69-71-63-73-53-59-76		14
5	Tagounite	106-110-118		03
6	Aït Youssi	3-4-6-9-11-10-16-18-20-23		10
Total				54

Le centre de chaque placette est matérialisé sur le terrain à la peinture (2 anneaux sur le tronc d'arbre du centre de la placette). En raison de la complexité voire de la spécificité des thématiques mises en jeu, dont les mesures portent soit sur le peuplement soit sur l'individu, la placette de forme circulaire proposée est de 30 mètres de rayon maximum. Cependant, cette dimension peut être variable autour du centre de la placette selon la nature et l'intensité des mesures et des informations prélevées en rapport avec chaque thématique (Figure 5).

Figure 5. Collecte des données dans une placette échantillon de 30 m de rayon



2.2. Justification du protocole d'échantillonnage retenu

L'établissement d'une méthode d'échantillonnage, pour détecter et pouvoir caractériser l'état sanitaire de la cédraie et évaluer l'importance et l'étendue des dégâts, soulève de nombreuses difficultés, elles-mêmes fonction du niveau de connaissance qu'on a sur le milieu et sur le phénomène étudié. Les méthodes d'échantillonnage sont multiples et chacune présente des avantages et des inconvénients. Le choix d'une méthode reste tributaire de la stratégie adoptée en adéquation avec les objectifs de l'étude en vue d'avoir une image qui reflète autant que possible la réalité du problème étudié.

Tout au long de la phase d'élaboration du protocole, toutes les méthodes ont été passées en revue et discutées par l'équipe de chercheurs (*échantillonnage aléatoire, systématique, stratifié et autres variantes*). Il est vrai que l'échantillonnage systématique assure une «**distribution homogène par rapport au terrain et qu'il est plus facile à matérialiser**». Cette confirmation n'est pas toujours vraie car ce type d'échantillonnage est basé sur la confection d'une grille de points d'échantillonnage superposable à la carte topographique (projection horizontale) une fois qu'on a fixé le nombre d'échantillons, le pas d'échantillonnage et le point de départ de l'échantillonnage. Cependant, dans la zone du projet, les forêts étudiées sont caractérisées par des discontinuités dans les peuplements de cèdre), des géométries spatiales irrégulières, des faciès et des reliefs variés et accidentés. Ces caractéristiques font que la matérialisation sur le terrain se trouve très difficile à asseoir et la distribution homogène par rapport au terrain n'est pas garantie en plus du biais qui sera engendré par le choix du premier échantillon et de la/ou des directions qui seront adoptées pour asseoir la grille d'échantillonnage.

A la suite des investigations et des constats préliminaires de terrain, il s'est avéré que le dépérissement est très dynamique et concerne surtout l'ensemble des faciès de la cédraie. Les relations entre les différents facteurs et l'ampleur des dépérissements est très difficile à cerner hypothéquant, de ce fait, toute idée de stratification a priori de l'échantillonnage. C'est d'ailleurs la raison principale pour laquelle l'échantillonnage stratifié n'a pas été retenu.

Le plan d'échantillonnage proposé, vérifié et étalonné à travers un inventaire préliminaire et une série de tests statistiques sur les paramètres du milieu et du peuplement, répond à un souci de rigueur et de faisabilité et à la réalité du terrain où en particulier, les parcelles de cèdre ne sont pas toujours contiguës. Par ailleurs, l'assiette des placettes par échantillonnage aléatoire simple ne pose plus de difficultés avec l'emploi de GPS.

Il n'en demeure pas moins que la définition de l'ensemble, qu'est l'échantillon, pose des problèmes de représentativité et de dimension de la placette. Les exigences du pédologue, de l'écophysiologiste, du dendrométricien, du dendrolochrologue, de l'entomologiste ou du phytopathologue, sont différentes.

Certaines données sont globales, définies au niveau de la placette, d'autres sont recueillies au niveau d'un élément de la placette : l'arbre, le profil du sol, etc. Dans ces conditions la codification des données est vitale et a des conséquences importantes sur les résultats car la qualification d'un caractère déterminera le traitement mathématique. De même, il est illusoire pour certaines disciplines, comme l'écophysiologie ou l'entomologie, d'échantillonner toutes les placettes et dans chacune d'elles les classes de dépérissement et réaliser la même batterie de variables sur les 54 placettes et sur les mêmes arbres échantillons, ce qui est irréalisable dans les conditions du projet.

En conclusion, le modèle d'échantillonnage retenu présente l'avantage de garantir une certaine qualité de représentation des différentes composantes du milieu écologique de l'espace étudié et de mieux appréhender l'analyse des interrelations entre les disciplines. Il constitue, de ce fait, le support expérimental à travers lequel seront recherchées les relations explicatives entre la santé du cèdre (structure à intérêt direct) et les divers facteurs explicatifs (effets directs ou produits d'interaction) relevant de toutes les disciplines concernées dans l'étude.

2.3 Champs disciplinaires et types d'investigations

L'approche méthodologique de l'étude comporte deux types d'investigations intéressant plusieurs champs disciplinaires :

- ◎ **Travaux thématiques spécifiques:** ces travaux, à l'échelle de l'arbre et du peuplement, sont à caractères biotiques (entomologie; phytopathologie...) ou abiotiques (écophysiologie, bioclimatologie, édaphologie, dendrochronologie...); ils devraient permettre de définir et de préciser le niveau d'action des facteurs quant au dépérissement : facteurs prédisposants, déclenchants ou aggravants et d'élaborer des indicateurs à cet effet.
- ◎ **Inventaire et aménagement forestier :** à l'échelle de la placette, il s'agit de fournir des paramètres dendrométriques fiables relatifs aux arbres sains, morts et dépéris en rapport avec les antécédents sylvicoles (inventaire phytosanitaire) et de proposer, compte tenu des résultats des études thématiques, un plan de gestion durable de la cédraie, objet de l'étude.

Il s'agit en fait d'un schéma général en vigueur au sein de la communauté scientifique qui travaille sur le dépérissement des forêts.

Le nombre de catégories de dépérissement ou «classes de dépérissement» à prendre en considération par chaque chercheur, a été conçu sur des bases scientifiques inhérentes à chaque discipline. En effet, chaque chercheur a présenté en détail sa propre approche du problème, et les limites de son approche. Ceci s'applique aussi aux fiches de données pour chaque thème de l'étude.

Le profil des chercheurs est varié afin de croiser les domaines de compétence et les conceptions. Cette pluridisciplinarité est renforcée par une double coordination, nationale et internationale, qui veille à assurer la complémentarité et à établir une communication équilibrée entre les disciplines mises en jeu et par la mise en place d'une cellule de gestion et de suivi du projet au niveau national.

Les consultants procèdent individuellement à leurs travaux d'analyse et de rédaction mais les synthèses et l'élaboration des propositions se font en commun après discussion et confrontation des points de vue.

Le projet implique aussi le personnel forestier de la zone d'étude et lui assure des formations complémentaires en rapport avec les différentes thématiques et les outils d'analyse utilisés.

2.4. Utilisation formelle d'outils d'analyse et de spatialisation du dépérissement

L'étude portant sur les causes du dépérissement du cèdre présente l'originalité d'être pluridisciplinaire et basée sur un protocole d'échantillonnage et de collecte des données unifié. Le support de l'information peut porter sur un espace (placette) ou sur un individu (arbre). Ainsi le caractère multivarié et multithématique de la problématique étudiée renvoie à des outils d'analyse globale pour une évaluation des relations inter et intra-thématiques.

Compte tenu de la masse d'information à exploiter, de sa nature et de sa diversité, les données collectées sont mises en forme dans un même système de référence par le SIG et hiérarchisées suivant deux principales composantes :

- la structure à intérêt direct ou la structure à expliquer. Elle concerne toutes les variables expression du dépérissement et de la santé du cèdre.
- la structure explicative, constituée de tous les facteurs susceptibles d'apporter une explication quant aux causes du dépérissement.

Les analyses font appel à une panoplie de méthodes statistiques descriptives, univariées, bivariées et multidimensionnelles, notamment l'analyse en composantes principales pour le traitement des variables quantitatives, l'analyse factorielle des correspondances et ses modèles sous-jacents d'aide à l'interprétation des données qualitatives ainsi que les méthodes sur variables instrumentales (Analyse factorielle des correspondances sur variables instrumentales (AFCVI) et Analyse en composantes principales sur variables instrumentales (ACPVI) ou l'Analyse canonique des correspondances pour le traitement de couples de tableaux.

Le SIG, avec l'avènement de la technologie informatique et de positionnement par satellite, est de plus en plus utilisé dans la majorité d'applications à caractère spatial, thématique et temporel.

L'objectif est de se doter d'un projet SIG, permettant aux différents champs disciplinaires de l'étude de fédérer leurs informations géographiques, d'homogénéiser les méthodes d'acquisition et de traitement, de mettre toute l'information géographique structurée dans un système à référence spatiale unique, afin d'étendre les champs d'analyse, de créer de nouvelles informations, et d'aider à la prise de décisions. Le SIG permet aussi de modéliser et structurer les données afin de permettre leur traitement et d'élaborer des cartes thématiques.

L'analyse des données multidimensionnelle et la cartographie et SIG aident à mettre en évidence une série de facteurs actifs impliqués dans le phénomène de dépérissement, leur hiérarchie et leur variabilité spatiale et temporelle. **La solution consiste alors à faire progresser de façon concomitante le modèle causal et les analyses multivariées pour mieux appréhender les liens de causalité et orienter l'élaboration d'un programme d'action et de guides de sylviculture à l'usage des gestionnaires.**

2.5. Importance des moyens mobilisés

La conduite et la réalisation des travaux thématiques, ainsi que l'élaboration de la base de données, a nécessité la mobilisation, par le HEFLCD et la FAO, de moyens importants pour chaque composante thématique, en particulier : le matériel technique spécifique; l'acquisition de données climatiques (précipitations, températures et neiges: données journalières etc.); l'acquisition de produits chimiques ; la logistique pour la formation des équipes de prospection (salle équipée pour la formation, fournitures de bureau etc.) ; les moyens de transport pour l'équipe de suivi et de contrôle des opérations et pour les équipes de terrain ; la main d'œuvre (agents occasionnels, opérateurs, techniciens, étudiants, ouvriers) pour la prospection sur le terrain ; frais de déplacement sur le terrain des consultants et des techniciens.

3. Analyses thématiques : Décrire pour mieux comprendre, résultats et acquis

Ce chapitre présente un résumé des résultats et acquis des études thématiques, pour les composantes : bioclimatologie et dendrochronologie, écophysiologie, sol et nutrition minérale des arbres, entomologie, inventaire dendrométrique et phytosanitaires et gestion antérieure des forêts, du «Rapport de synthèse des études thématiques», élaboré par le coordonnateur lors de la 3ème phase de l'étude.

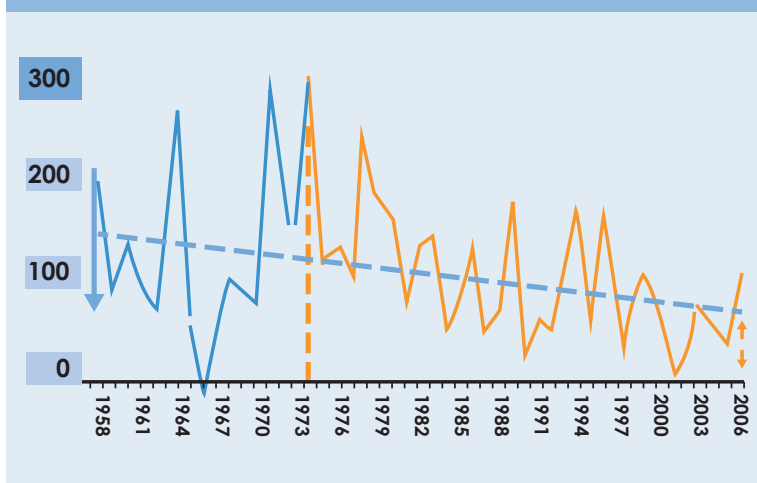
3.1. Analyse bioclimatologique et dendrochronologique

L'étude bioclimatologique et dendrochronologique (A. Mokrim, 2008) appréhende la problématique du dépérissement du cèdre à travers les composantes climatique et dendrochronologique. L'accent est mis sur les évolutions et les tendances des paramètres climatiques, du bilan hydrique et du bilan de la croissance chez le cèdre. Les données climatiques utilisées sont relatives à la station d'Ifrane (période 1930-2005) représentative de l'ensemble de la zone d'étude. Le nombre d'arbres carottés, pour l'analyse des cernes, est de 332 arbres ventilés sur 27 placettes du protocole unifié d'échantillonnage.

Les résultats principaux de cette analyse sont résumés ci-après.

La série des températures moyennes, maximales et minimales mensuelles d'Ifrane montre une élévation pour la majorité des mois et tout spécialement pour les mois de mars, mai, juin et novembre. La décennie 1980-2000 présente les minima les plus élevés. La pluviométrie annuelle d'Ifrane a baissé de près de 24% entre les périodes (1930-1980) et (1981-2006), tandis que la fréquence des années sèches est passée de 59 à 77%. La tendance à la baisse des précipitations neigeuses (*Figure 6*) est saillante durant toute la période (1981-2006). Les précipitations pluvieuses et neigeuses tendent vers davantage de concentration sur l'hiver avec une baisse durant le printemps.

Figure 6. Evolution des précipitations neigeuses en (cm) à Ifrane



L'encadré 1 présente un résumé de la méthode et du matériel utilisé.

Encadré 1. Méthode et matériel de l'analyse bioclimatique et dendrochronologique (Résumé)

1. Evolution de réserve hydrique du sol à partir de séries climatiques quotidiennes

La détermination des évolutions de réserve hydrique du sol à partir de séries climatiques quotidiennes nécessite une modélisation du bilan hydrique. Ce modèle établit, selon le pas de temps retenu (jour, semaine, mois...), le bilan entre les entrées et les sorties d'eau au niveau du sol (Breda et Peiffer 1999). Le bilan hydrique est approché sur la base des précipitations et de l'évapotranspiration potentielle (ETP). Les séries pluviométriques ont fait l'objet d'une étude de caractérisation inter et intra annuelle (changements, tendances, périodicités, pics,...). Il en est de même pour les enregistrements des températures, pour l'estimation de l'ETP et pour le bilan ($P - ETP$). En tenant compte du pouvoir de rétention en eau des sols de la région, l'évolution du déficit hydrique au fil des années couvertes par les enregistrements est analysée du point de vue de son intensité et des épisodes de contrainte hydrique.

L'ensemble de ces données est, par la suite, mis en relations avec les séries des épaisseurs de cernes.

2. Analyses dendrochronologiques

La dendrochronologie repose sur l'analyse des variations de largeurs de cernes observées dans le bois des arbres. Ainsi la caractérisation du dépérissement est appréhendée à travers l'analyse de l'historique du phénomène et de son impact (qualitatif et quantitatif) sur la croissance des arbres.

Le nombre de placettes retenues pour l'échantillonnage est 27 (vingt-six sites), soit une placette sur 2 parmi les 54 du protocole unifié d'échantillonnage, en tenant compte des similitudes écologiques (lithologie, exposition altitude, pente...) des placettes, de leurs positions géographiques (nord, sud...) et des paramètres de caractérisation des peuplements (état, densité). Par placette, 10 arbres de l'étage dominant et codominant sont recrutés à partir du centre de la placette. Le lot échantillonné inclut deux arbres morts, deux arbres sains. Le nombre des arbres stressés est ventilé sur les classes de dépérissement retenues.

L'analyse du matériel et le traitement des données (préparation du matériel, mesure des cernes, représentation graphique des mesures sous forme de courbe dendrochronologique élémentaire, synchronisation des courbes dendrochronologiques) conduit à leur synthèse sous forme de chronologie totale. Le lissage et le calcul des indices ont lieu d'emblée après la synchronisation et sont uniquement basés sur l'observation de l'allure des chronologies élémentaires. L'étude des relations entre la croissance annuelle des arbres et le climat actuel s'appuie, ainsi, sur le concept de fonction réponse introduit par Fritts (1976) et largement développé par la suite. Ces fonctions sont calculées à l'aide d'une combinaison de plusieurs méthodes statistiques : analyse de régression, analyse factorielle et analyse spectrale.

La dynamique spatio-temporelle du dépérissement est caractérisée à travers:

- la datation du début du phénomène apprécié par une réduction de la croissance radiale et, éventuellement, la durée relative des phases de prédisposition et de déclenchement du phénomène ;*
- la détermination du mode et de la vitesse de propagation dans l'espace ;*
- la relation avec les facteurs écologiques (pente, exposition, altitude, lithologie, fertilité de la station...), dendrométriques (hauteur des arbres dominants, diamètre, âge, surface terrière et volume sur pied;...) et morphométriques (surface basale de la couronne, hauteur du houppier).*

Cette caractérisation tient compte des classes de dépérissement et permettra d'apprécier dans quelle mesure cette classification est reflétée par le comportement au niveau de l'activité de croissance.



Concernant le profil d'évolution du bilan hydrique et de la saison de croissance du cèdre, les mois de juin à septembre sont marqués par un déficit avec un pic d'environ (-100 mm) en juillet – août. La croissance du cèdre durant la période 1989 - 2006 a porté sur 5 mois tandis que celle de 1981-1988 n'a porté que sur moins de 3 mois avec quelques exceptions.

Le nombre de mois secs par an a oscillé entre 2 mois en 1989 et 1996 et 7 mois en 1999 et 2002. L'épaisseur du cerne moyen relatif à la chronologie maîtresse est de 2,01 mm pour la période (1940–2006) contre 1,40 mm pour la période (1976 – 2006). La perte de vigueur de croissance entre ces deux périodes est de 30%. Les années 2005, 2000, 1995, 1987, 1983 et 1981 ont formé des cernes très minces sur l'ensemble des chronologies moyennes relatives aux parcelles. La corrélation entre les chronologies moyennes et le bilan hydrique mensuel, durant la saison de croissance du cèdre, est significative pour la majorité des parcelles. Les mois de juin, juillet et août présentent les coefficients de corrélations les plus élevés.

L'évolution des indices de croissance du cèdre, des indices pluviométrique et ceux du bilan hydrique (*figure 6*) montrent une quasi parfaite concordance. La mort des arbres a débuté en 1994–95. Des vagues de mortalité d'arbres sont relevées durant la période (1998 - 2003) et en 2005. Ces années se caractérisent par des hivers à bilan hydrique négatif (1995 et 2002) ou faiblement positif pour les hivers (1997 et 2000). En l'an 2002 la durée de la saison de croissance se limitait à un mois contre 2 mois pour l'année 1999. Les années 1999 et 2002 ont présenté également une saison sèche étalée sur 7 mois et la même durée pour ce qui est des bilans hydriques mensuels déficitaires.

La tendance des précipitations pluvieuses et surtout neigeuses vers la baisse en valeur absolue et vers une concentration dans le temps, l'augmentation de la température et son impact sur le bilan hydrique et la réduction de la durée de la saison de croissance contribueront à limiter l'activité de croissance chez le cèdre. La persistance et l'amplification de cette limitation constituent des facteurs d'autant plus prédisposant au phénomène du dépérissement que les conditions de station sont moins favorables.

La combinaison de l'ensemble des paramètres bioclimatique et dendrochronologique étudiés, dans cette composante laisse présager que la prédisposition des arbres au dépérissement émane d'une sensibilité écologique en rapport avec le bilan hydrique et d'une sensibilité dendrométrique en rapport avec une sylviculture timide voire, quasi absente dans ces peuplements.

L'encadré 2 donne un résumé des résultats et acquis de l'analyse bioclimatique et dendrochronologique.

Encadré 2. Résumé des résultats et acquis de l'analyse bioclimatique et dendrochronologique

- Cinq épisodes de sécheresse sur les douze, qu'a connus le siècle dernier au Maroc, ont eu lieu durant la période entre 1982 et 1996.
- Tendance à l'augmentation des températures moyennes, maximales et minimales, de 0,5°C, durant la période 1981-2006.
- Baisse de précipitations de 24% entre les périodes (1930-1980) et (1981-2006).
- Fréquence des années sèches de 59 à 77% entre (1930-1980) et (1981-2006).
- Tendance à la baisse de la neige plus marquée depuis les années 80.
- Concentration des précipitations en hiver et baisse au printemps.
- Perte de vigueur de croissance de 30% : le cerne moyen est de 2,01 mm pour la période (1940-2006) contre 1,40 mm pour (1976 - 2006).
- Concordance des chronologies d'épaisseurs de cerne et des classes de dépérissement ou degré de stress des arbres.



Figure 7. Indice de croissance et indices climatiques

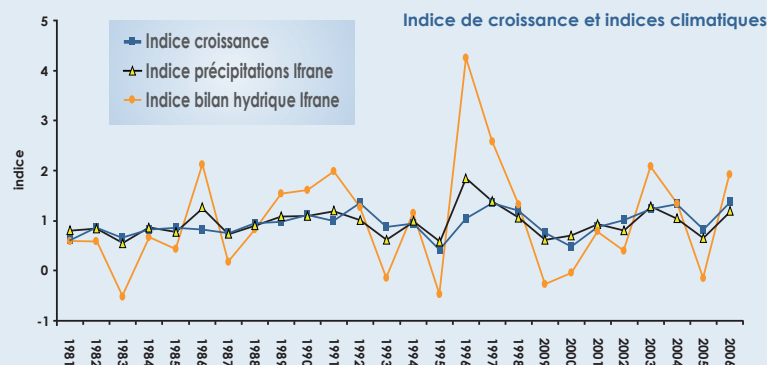
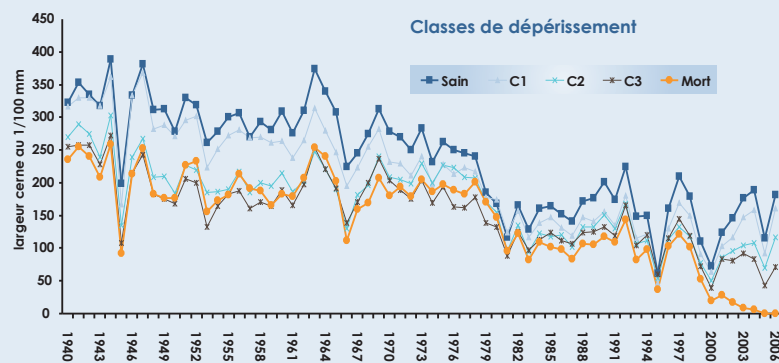


Figure 7'. Indice de classes de dépérissement



3.2. Analyse écophysiological

L'analyse du comportement écophysiological des arbres de cèdre de l'Atlas dans le cadre de ce travail (A. Zine Elabidine, 2008) a été entreprise par les mesures des paramètres du potentiel hydrique du xylème et la détermination du contenu en eau relatif du sol (CER) des placettes échantillons du protocole unifié d'échantillonnage. Ces mesures ont été réalisées sur 3 arbres sains et 3 arbres dépérissant identifiés au niveau de 6 placettes représentatives de la diversité écologique des peuplements de cèdre au niveau de la forêt d'Azrou et de Ait Youssi.

Les mesures ont été réalisées, de façon régulière durant la période mars - juillet 2007, pour assurer le suivi du comportement écophysiological des arbres de cèdre en fonction de l'évolution des facteurs climatiques au cours du printemps et au début de l'été 2007.

L'encadré 3 présente un résumé de la méthode et du matériel utilisé.

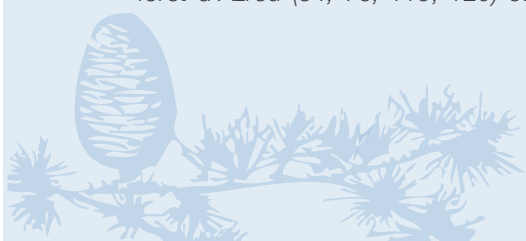
Encadré 3. Méthode et matériel de l'analyse écophysiological (Résumé)

1. Paramètres d'évaluation

Les paramètres retenus pour analyser les fluctuations du potentiel hydriques des arbres du cèdre de l'Atlas, sont : le potentiel hydrique à l'aube (PHB), le potentiel hydrique de midi (PHM) et l'amplitude journalière du potentiel hydrique (AJPH), avec $AJPH = PHB - PHM$. Les mesures du potentiel hydrique (pression de la sève) ont été opérées sur des brindilles de 5 à 10 cm à l'aide de la « Chambre à Pression » (appelée également Chambre de Scholander ou Bombe à Pression). La pression de mesure est générée par une bonbonne d'azote de 9 m³. La teneur en eau des sols exprimée par le contenu en eau relatif (CER (%)) a été aussi déterminée, par gravimétrie, à chaque mission de terrain. Une fiche de mesure des paramètres écophysiological a été élaborée à cet effet.

2. Protocole de mesure du potentiel hydrique des arbres

Les mesures ont été réalisées au niveau de 6 placettes dont 4 au niveau de la forêt d'Azrou (54, 76, 119, 120) et 2 au niveau de la forêt de Ait Youssi (4,10). Ces placettes ont été identifiées en concertation avec le consultant en dendroclimatologie, le responsable du CDF d'Azrou et en considérant leur représentativité quant à la diversité écologique des peuplements des deux forêts.



Au niveau de chaque placette, 3 arbres sains (classe 0) et 3 arbres dépérissants (classe 2 et 3) ont été identifiés, numérotés et marqués à la peinture jaune et leurs caractéristiques dendrométriques (hauteur et diamètre à 1,30 m) ont été notés. Les mesures ont été effectuées à quatre reprises en mars, mai, juin et juillet 2007. Au printemps et au début de l'été, afin de tenir compte de la variation mensuelle et saisonnière des conditions climatiques dans la zone d'étude. A chaque période de mesures des observations concernant la phénologie et la vigueur des arbres de cèdre ont été notées, de même que les conditions climatiques générales. Le potentiel hydrique a été mesuré sur 36 arbres (3 arbres sains et 3 arbres dépérissants par placette) à raison de deux échantillons par arbre, le matin avant le lever du soleil (entre 4h00 et 6h00) et vers le milieu de la journée entre 12h00 et 14h00. Des brindilles de 10 à 20 cm ont été prélevées, à l'aide du sécateur télescopique, à une hauteur de 6 à 8 m en fonction de la disponibilité des branches les plus proches, mis en sac de plastique et gardés dans le froid dans une glacière pour mieux conserver leur l'état hydrique. Au total 144 échantillons (36 arbres x 2 x 2) sont mesurés durant les trois jours de chaque mission. Le travail sur le terrain se déroulait, généralement de 4h00 du matin jusqu'à 17h00 du soir.

3. Evaluation de la teneur en eau du sol

Le contenu en eau relatif du sol (CER) a été déterminé, au sein des placettes, par gravimétrie. Les mesures de l'humidité des sols ont été réalisées sur trois échantillons par placettes aux alentours des arbres échantillonnés pour la mesure du potentiel hydrique. Les échantillons ont été prélevés dans les mêmes localités au niveau des placettes afin de suivre la teneur en eau des sols durant les missions de terrain. Le contenu en eau relatif (CER) est calculé selon la formule suivante :

$$\text{CER (\%)} = \frac{[\text{PF (poids frais)} - \text{PS (poids sec)}]}{\text{PS}}$$

4. Analyse des résultats

Les données obtenues ont permis d'analyser la cinétique des paramètres du potentiel hydrique des arbres en relation avec l'évolution des paramètres de l'environnement et la phénologie des arbres.



Les résultats principaux de cette analyse (Figures 7, 8 et 9) sont résumés ci-après :

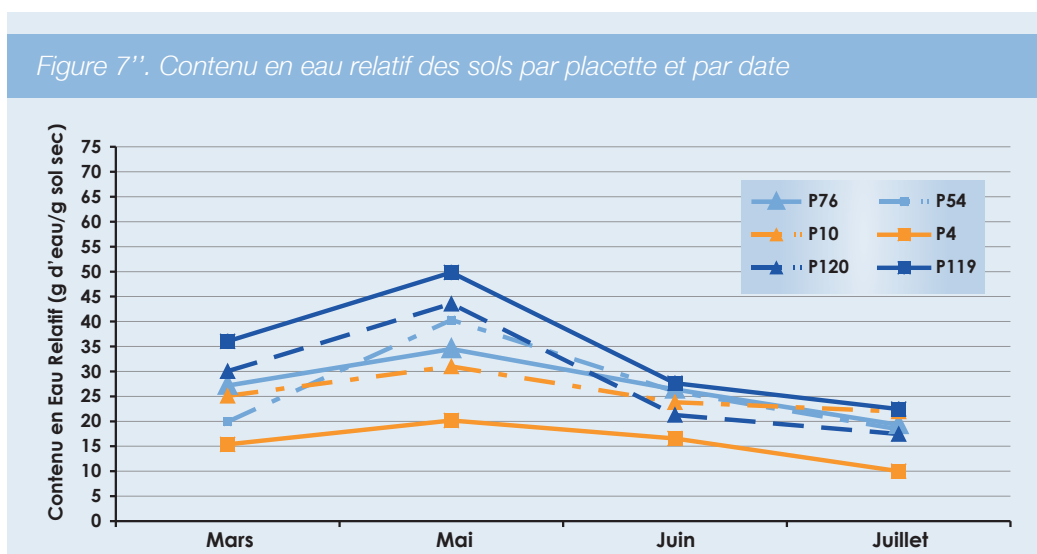
Le comportement écophysologique du cèdre de l'Atlas est lié, de façon significative :

- Aux changements des conditions climatiques.
- À la diversité des habitats.
- À la disponibilité de l'eau dans le sol.
- À la vigueur des arbres.

Les valeurs de la teneur relative en eau des sols mesurées dans ce travail se situent largement entre l'humidité équivalente (capacité au champ) et le point de flétrissement temporaire déterminé au laboratoire pour les mêmes types de sol. Même en mi-juillet, les sols n'ont pas présenté des teneurs en eau très faibles. Mais il paraît qu'à partir de fin juillet, le CER des sols devrait tendre vers des niveaux plus proches du point de flétrissement temporaire, ce qui créerait des conditions difficiles pour le développement de cèdre et son comportement écophysologique. Durant l'été et l'automne, les difficultés de déficit hydrique des sols sont associées aussi au réchauffement du climat et à l'avènement du vent chergui sec et chaud soufflant de l'Est, assez fréquent en cette période.

A ce réchauffement saisonnier, il faut ajouter aussi la tendance générale de réchauffement du climat au moyen Atlas et la diminution sensible de l'importance des précipitations pluvieuses et neigeuses (voir Analyse dendroclimatologique). Ces difficultés sont accentuées aussi par les caractéristiques physiques des sols dont la plupart sont peu profonds à superficiels, contenant un taux du sable important et développés sur des terrains en pente (voir Analyse pédologique).

La résultante de tous ces facteurs écologiques défavorables crée des conditions difficiles pour le développement du cèdre de l'Atlas dont la gravité est fortement accentuée au cours des années sèches et par la conjoncture des conditions locales défavorables telles que les expositions chaudes, les pentes fortes et des peuplements denses.



Le débourrement des bourgeons du cèdre de l'Atlas a commencé au début de mai et paraît plus précoce au niveau des arbres des placettes 119 et 120 de la forêt de Sehbe sur substrat basaltique qu'au niveau des autres placettes. La croissance s'est poursuivie en juin, mais s'est ralentie nettement en juillet. Il semble que la croissance active du Cèdre au Moyen Atlas a été étalée sur 2,5 mois environ.

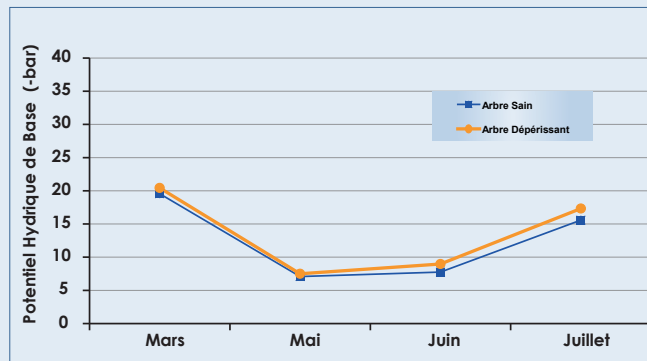
Les observations de phénologie ont montré aussi que la croissance des arbres de cèdre est plus dynamique et plus étalée au niveau des placettes 119 et 120 sises dans la forêt de Sehbe qui se développe sur basalte, qu'au niveau des placettes de la forêt de Ait Youssi (4 et 10) sur substrat dolomitique et mêmes celles du canton de Boutrouba (Forêt d'Azrou) sur calcaire exposées à l'est (54 et 76). Au niveau de ces placettes, le débourrement des bourgeons a été plus tardif, alors que la croissance des pousses du cèdre s'est ralentie visiblement à la mi-juillet 2007. Le dépérissement est plus marqué au niveau de ces placettes.

Les arbres dépérissant se démarquent significativement des arbres sains par un potentiel hydrique de base et un potentiel hydrique de midi plus négatifs et une amplitude journalière du potentiel hydrique généralement plus élevée.

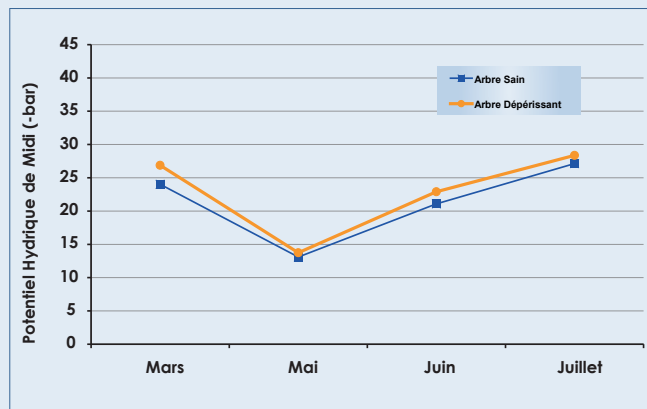
Les différences sont plus marquées pendant les périodes difficiles (mars, juin et juillet) et au niveau des stations qui offrent des conditions écologiques défavorables (substrat calcaire, sol superficiel, exposition sud...). Ce comportement indique que ces arbres sont plus stressés et présentent, de ce fait, des difficultés pour absorber l'eau à partir du sol et contrôler les pertes en eau par transpiration (*Figures 8 et 9*).

Figure 8. Variation du potentiel hydrique des arbres sains et dépérissant par date

A Potentiel Hydrique de Base Moyen



B Potentiel Hydrique de Midi Moyen



C Amplitude Moyenne Journalière du Potentiel Hydrique

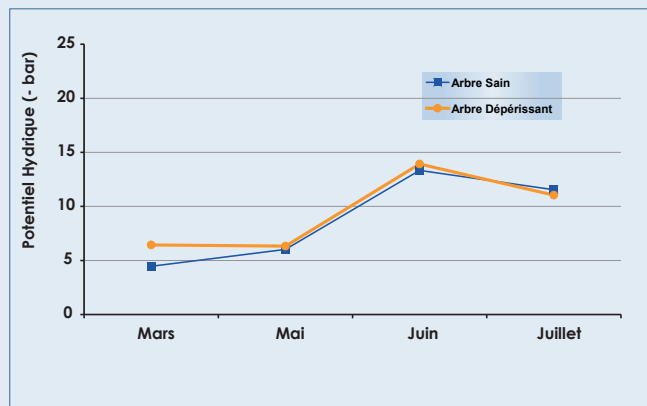
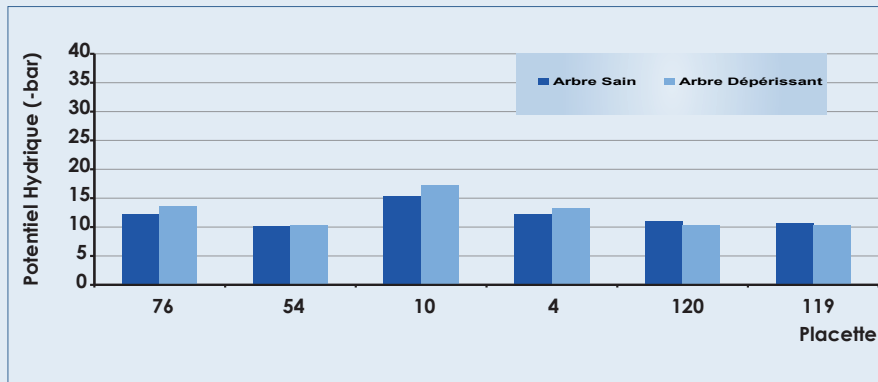
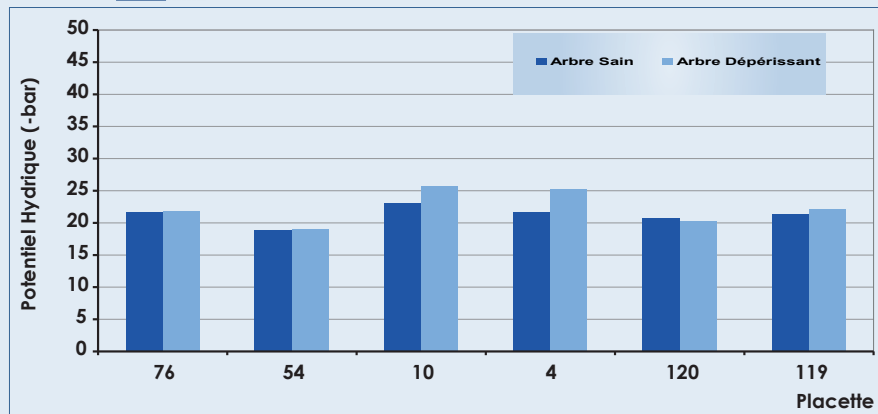


Figure 9. Potentiel hydrique par type de vigueur et par placette

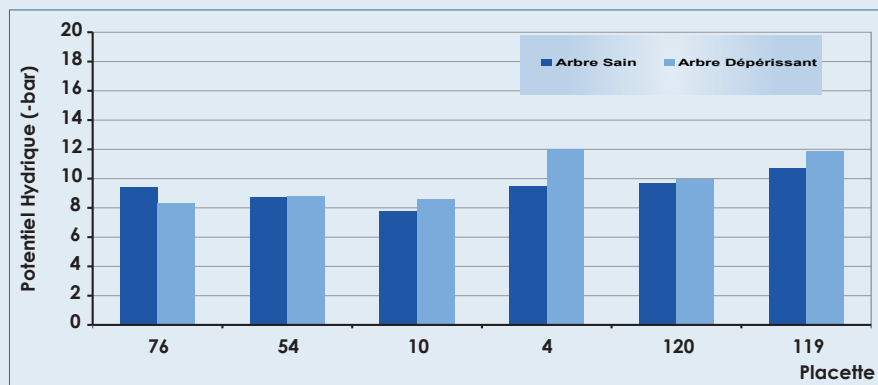
A Potentiel Hydrique de Base Moyen



B Potentiel Hydrique de Midi Moyen



C Amplitude Journalière Moyenne du Potentiel Hydrique



Les différences observées entre les arbres sains et les arbres dépérissant sont plus importantes pendant les périodes difficiles comme les mois de mars, juin et juillet et au niveau des placettes où les conditions écologiques sont défavorables et les peuplements mixtes de cèdre et de chêne vert avec une forte densité. Les peuplements de cèdre sur substrats basaltiques sont très peu touchés par le dépérissement. Cependant, les peuplements mixtes de cèdre et de chêne vert montrent plus de dépérissement des arbres de cèdre.

La réduction des disponibilités hydriques induirait une forte compétition entre les arbres du cèdre conduisant au déclenchement du phénomène de dépérissement qui s'attaque aux arbres les plus sensibles et les moins adaptés qui sont les premiers à être éliminés «l'auto-éclaircie = self-thinning».

La fermeture des stomates des aiguilles, évaluée indirectement par l'amplitude journalière du potentiel hydrique nulle, n'est atteinte qu'à un niveau de potentiel hydrique de base très faible de l'ordre de (-30 bars) et plus. Ce comportement montre le caractère non conservateur de l'eau par le cèdre de l'Atlas. Néanmoins, cette espèce se caractérise par un potentiel très dynamique d'absorption d'eau par les racines qui colonisent principalement les couches supérieures du sol et qui réagissent rapidement à l'amélioration de la teneur en eau des sols.

L'encadré 4 ci-après présente un résumé des résultats et acquis.

Encadré 4. Résumé des résultats et acquis de l'analyse écophysologique

- Les arbres présentent un déficit hydrique à l'état d'équilibre avec le sol en mars et juillet 2007 (PHB de -14,75 à -27,75 bars).
- La variabilité des paramètres du potentiel hydrique confirme l'effet des conditions stationnelles (bilan hydrique) et temporelles (pluies fortuites).
- Le cèdre est caractérisé par un potentiel global de transpiration important (AJPH: de -8 à -12 bars) proche du PHC -30 bars /printemps.
- Le potentiel hydrique de base critique, qui traduit le début d'un état de stress grave, est de l'ordre de -30 bars, alors que le potentiel hydrique de base optimale est supérieur à -20 bars. les peuplements sur substrat calcaire ou dolomitique avec des sols superficiels sont proches du potentiel hydrique critique en mars et en juillet;
- Les arbres dépérissants ont été plus stressés que les arbres sains (PH plus négatif, AJPH plus importante), pour des conditions de milieu défavorables et des peuplements de cèdre/chêne vert à forte densité.
- Le Cèdre est essence de lumière à tempérament délicat qui contrôle peu efficacement les pertes en eau par transpiration « non conservateur de l'eau» et cherche l'eau facilement disponible (espèce opportuniste sur le plan hydrique).



L'analyse des valeurs du potentiel hydrique de midi (PHM) enregistrées chez les arbres sains et dépérissant a montré que ce paramètre a atteint, pendant la période de mesure, des valeurs proches du potentiel hydrique critique (- 30 bars) notamment en mars et juillet 2007. Cet état de stress est plus prononcé chez les arbres dépérissants des parcelles 76, 54, 10 et 4 situées dans le contant de Boutrouba (forêt d'Azrou) et la forêt de Ait Youssi. Il est à souligner que cet état de stress se produit alors que les sols n'ont pas encore atteint des niveaux de déficit hydrique critique. Il est certain que le niveau de stress hydrique deviendrait de plus en plus accentué au cours de l'été et même en début d'automne avec la réduction des disponibilités hydriques des sols.

Les indications observées peuvent expliquer l'abondance des arbres dépérissants et morts au niveau des parcelles 76, 54, 10 et 4 situées dans des conditions écologiques peu favorables.

En conclusion, le cèdre se comporte comme une essence de lumière qui ne contrôle pas efficacement, par ses stomates, les pertes en eau par transpiration. La fermeture des stomates (amplitude journalière du potentiel hydrique nulle) n'est atteinte qu'à un niveau de potentiel hydrique de base très faible de l'ordre de -30 bars et plus.

Toutefois, il n'en reste pas moins vrai que des recherches sont nécessaires pour améliorer la connaissance du comportement écophysologique du cèdre dans son milieu naturel, en rapport avec les changements climatiques, dans les domaines suivants, entre autres :

- ⊙ Le fonctionnement hydrologique des peuplements forestiers.
- ⊙ L'analyse des relations de compétition entre le cèdre et le chêne vert.
- ⊙ La construction de normes de densité pour une sylviculture adaptée.

3.3. Caractérisation du sol, nutrition du cèdre et suivi de l'humidité

L'analyse édaphologique (*M. Chouraichi, 2008*) se propose d'évaluer la relation entre les paramètres physiques, chimiques et hydriques du sol et le dépérissement du cèdre. A cet effet, les sols appartenant aux 54 placettes du protocole unifié d'échantillonnage sont étudiés. Sur les 54 profils décrits, 56 échantillons, prélevés de 26 profils types, ont fait l'objet d'analyse complète au laboratoire.

De même, le stock d'eau du sol est évalué à travers le suivi de l'humidité sur 30 échantillons provenant des 14 placettes les plus représentatives de la zone. Les cèdres, avoisinants les 14 profils suivis, ont fait l'objet de prélèvements d'aiguilles pour déterminer la composition minérale de leurs aiguilles par l'analyse foliaire.

L'encadré 5 présente un résumé de la méthode et du matériel utilisé. Les résultats principaux de cette analyse sont résumés ci-après :

Encadré 5. Méthode et matériel de l'analyse du sol et la nutrition minérale des arbres

1. Typologie des sols

La reconnaissance des sols et l'évaluation de leur état de dégradation sont entreprises à travers :

- l'interprétation de la lithologie en relation avec les autres facteurs de la pédogenèse, basée sur les données disponibles pour la région.
- les prospections de terrain pour la caractérisation morpho-pédologique et génétique des sols.

Les prospections concerneront l'ensemble des 54 placettes du protocole d'échantillonnage unifié. Les résultats ont permis d'établir une typologie des sols, de la confronter avec l'importance du dépérissement sur chaque type, et d'en tirer les facteurs discriminants (nature du substrat, profondeur des sols, pente, importance et type de matière organique, drainage,...).

2. Etude détaillée sur stations représentatives

Les résultats de la typologie globale des sols sont examinés par rapport à ceux des autres disciplines impliquées dans la présente étude afin d'identifier des placettes représentatives sur lesquelles une étude détaillée des sols et de leur régime hydrique sera effectuée. Sur chaque placette représentative, un profil est excavé et décrit ; des échantillons sont prélevés sur les différents horizons observés pour des analyses physico-chimiques.

3. Evaluation de la fertilité du sol

Les prélèvements pour l'évaluation de la fertilité des sols sont réalisés au début du printemps, période de démarrage de l'activité d'absorption par le cèdre ainsi que de la minéralisation de la matière organique. La caractérisation des paramètres suivants est proposée à savoir : la matière organique, le carbone total, l'azote total, le rapport C/N, le phosphore assimilable et le potassium échangeable.



4. Diagnostic foliaire et statut nutritionnel du cèdre

Le diagnostic foliaire renseigne sur le statut nutritionnel des arbres en réponse aux conditions hydrominérales du sol. Dans ce sens, sont effectuées :

- *Des observations foliaires sur le feuillage d'arbres en voie de dépérissement en comparaison avec des arbres sains.*
- *Des analyses foliaires d'azote, de phosphore et de potassium. Les échantillons sont prélevés au mois de juin à un niveau approprié du houppier, sur les rameaux de l'année et sur les deux facettes d'exposition des arbres.*

5. Régime hydrique des sols

Les prélèvements sont effectués sur les placettes retenues, à la tarière pour les sols fins ou à la pelle pour les sols grossiers, de manière régulière à raison d'une fréquence d'un prélèvement par mois. La méthode de mesure gravimétrique avant et après séchage des échantillons à 105°C est utilisée. Les prélèvements sont réalisés à deux profondeurs en fonction de l'épaisseur du sol. L'humidité pour chaque horizon ainsi que l'humidité moyenne pondérée du sol sont déterminées en prenant en considération les épaisseurs des horizons adoptées. Sachant que la forêt du cèdre a été soumise à une sécheresse récurrente durant les trois dernières décennies, l'évaluation du régime hydrique sur une seule année n'est pas suffisante à elle seule pour répondre de façon solide à la question de dépérissement du cèdre. Néanmoins, elle peut compléter les autres données, notamment dendrochronologiques et écophysiologicalues.

6. Synthèse des travaux

Les données recueillies sont (i), analysées et interprétées pour faire ressortir les liens relationnels qui peuvent expliquer l'occurrence et la répartition du dépérissement du cèdre dans la zone et (ii) confrontées aux résultats obtenus par les autres spécialistes en vue d'examiner les causes possibles du dépérissement ainsi que les facteurs aggravant l'impact de ces causes.



Concernant les propriétés physiques et chimiques des sols

Les sols rencontrés dans la zone d'étude appartiennent à trois classes :

- Sols peu évolués non climatiques.
- Sols Calcimagnésiques.
- Sols Fersiallitiques.

Ces sols se répartissent en quatorze unités principales (*Tableau 4*).

Les sols peu évolués sont les plus répandus dans cette zone (65% des placettes), suivis des sols fersiallitiques (26%) et viennent enfin les rendzines dolomitiques avec 9% des placettes.

La moitié des placettes (54%) est caractérisée par des sols ayant une profondeur comprise entre 60 et 80 cm et plus. L'autre moitié des placettes, soit 46% du total à une profondeur inférieure à 60 cm.

Le pourcentage des placettes dont les sols ont une teneur en sable supérieure à 60% augmente avec la profondeur. Ce sont les sols de texture sableuse en profondeur qui dominent. En effet, la teneur en sable dans ces placettes passe de 8% dans l'horizon de surface à 58% en profondeur au niveau de l'horizon 60 - 90 cm.

Les sols de cette zone ayant une teneur en sable élevée en profondeur ont souvent un taux de CaCO_3 total élevé à très élevé. Une relation entre les sols ayant une teneur en CaCO_3 total supérieure à 15% et le taux de sable a été établie:

Teneur en $\text{CaCO}_3 = 0,48 * (\text{teneur en sable}) + 29,45$.

Les analyses de la fertilité ont permis de montrer que les sols de la zone ne présentent pas de carences minérales. En effet, la majorité des sols de cette zone sont relativement riches en azote minéral et en phosphore assimilable et très riches en potassium assimilable. De même, l'analyse foliaire des aiguilles du cèdre a montré que de la majorité des placettes étudiées dans la zone présente une composition minérale en général relativement correcte par rapport à la placette témoin.

Tableau 4. Types de sols rencontrés dans la zone

Classe	Sous-classe	Groupe	Sous- groupe	Famille	Série	N° Unité	
Sols peu évolués	Non climatiques	Erosion	Lithiques	Sur matériau de texture fine reposant sur dolomie	Squelettiques	1	
			Régosoliques humifères	Sur matériau de texture équilibrée à fine, reposant sur sable dolomitique caillouteux	Peu profonds	2	
		Apport colluvial	Humifères		Sur matériau de texture fine, reposant sur blocs et cailloux dolomitiques	Moyennement profonds	3
					Sur matériau de texture fine, reposant sur blocs dolomitiques	Profonds	4
					Sur matériau de texture équilibrée à fine, reposant sur sable dolomitique	Très profonds	5
					Matériau de texture équilibrée à fine, reposant sur basalte altéré	Peu profonds	6
						Moyennement profonds	7
						Profonds	8
			Humifères vertiques	Sur matériau de texture fine à très fine	Très profonds	9	
Sols calcimagnésiques	Saturés	Sols calcimagnésiques	Rendzines dolomitiques	Sur matériau de texture fine à très fine, reposant sur blocs de dolomie	Squelettiques à peu profonds	10	
Sols à sesquioxides de fer	Fersiallitiques	A réserve calcique peu lessivés	Modaux	Sur matériau de texture fine, reposant sur blocs du calcaire lacustre ou de dolomie	Moyennement profonds	11	
				Sur matériau de texture fine, reposant sur cailloux et graviers de dolomie enrobés de calcaire	Moyennement profonds	12	
				Sur matériau de texture fine, reposant sur cailloux et graviers de dolomie	Profonds	13	
				Sur matériau de texture fine, reposant sur blocs de dolomie enrobés de calcaire	Profonds à très profonds	14	

Concernant les propriétés hydriques des sols

Les résultats des propriétés hydriques ont permis d'établir une relation entre l'humidité équivalente (HE) et la somme des fractions d'argile et de limon total ($A+L$) qui se traduit par la formule : $\{HE = 0,33*(A+L) + 7,45\}$. Cette relation montre que la capacité de rétention de l'eau de ces sols augmente quand la somme des fractions argile et limon augmente. Ainsi, la détermination des fractions ($A+L$) par granulométrie permet d'estimer avec une bonne précision (86%) l'humidité équivalente du sol. Les valeurs de l'humidité équivalente diminuent avec la profondeur selon la teneur du sable.

Les résultats de la réserve en eau utile du sol (RU) ont permis de montrer que les sols les plus répandus (65% des placettes) dans la zone (*groupes III et IV*) ont une (RU) faible à moyenne ($<100mm$). Ces sols constituent les aires les plus sensibles au dépérissement du cèdre si la pente est forte et si l'exposition est sud ou est. Les sols à RU supérieure à 150 mm (*groupes I et II*) ne représentent que 35% du total des placettes. Il s'agit essentiellement de sols évolués d'apport colluvial verticaux de texture très fine et de sols fersiallitiques profonds et de texture fine qui sont parmi les meilleurs sols pour le développement du cèdre, si les autres paramètres sont favorables.

Le suivi de l'humidité a permis de constater que 54 % des placettes ont moins de 50% du stock d'eau par rapport à la placette témoin. Les sols appartenant aux groupes I et II (35% du total des placettes) constituent des réserves en eau relativement importantes (97 - 116 mm) au mois de juillet. Ces sols sont constitués de sols argileux qui se dessèchent moins vite. En effet, ils présentent au mois de juillet un surplus net du stock d'eau par rapport à la RU . Par contre, les sols appartenant aux groupes III et IV montrent déjà un déficit hydrique net au mois de juillet.

Concernant la relation «dépérissement-paramètres physiques et hydriques du sol»

Les investigations montrent, que le dépérissement du cèdre dans la zone étudiée semble lié plus au régime hydrique du sol qui dépend essentiellement de la réserve en eau utile (RU). Celle-ci dépend, à son tour, de la profondeur d'enracinement du cèdre, de l'humidité équivalente, de la densité apparente du sol et du pourcentage de la terre fine.

Un sol avec une RU importante est moins exposé aux effets de dessèchement qu'un sol à RU réduite, à condition que la pente et l'exposition ne soient pas défavorables. Plus la RU du sol est élevée, plus tard apparaissent les effets du déficit hydrique (*tableau 5*).

Le régime hydrique et le stock d'eau du sol dépendent des principales caractéristiques suivantes : la RU du sol ; le substrat sur lequel est formé le sol (argile, basalte, blocs de dolomie discontinus, dolomie massive) ; la teneur du sable total et la teneur en $CaCO_3$ au niveau 30- 60 cm de profondeur; la pente; l'exposition. Plus le nombre de paramètres défavorables est grand, plus le taux de dépérissement du cèdre est élevé.

Tableau 5. Comportement du cèdre vis à vis des caractéristiques édaphiques		
Types de sols	Caractéristiques dominantes	Structure et comportement du cèdre
Sols peu évolués d'érosion peu profonds	Sur blocs de dolomie - P > 25% - S/SE - RU : 50 mm	densité du cèdre : 25% déperissement important : ~ 40%
	Sur dalle dolomitique - P ≤ 8% - S/SE - RU : 29 mm	densité du cèdre : 25% en mélange avec du chêne vert - déperissement important : ~ 50 %
Sols peu évolués d'apport colluvial profond	Sur sable dolomitique - 8% < P ≤ 25% - E - RU : 79 mm	densité du cèdre : 40% déperissement : ~ 10 % à 15%
	Sur basalte altéré - P < 1% - replat - RU : 39 mm	densité du cèdre > 90% déperissement faible < 5%
Sols peu évolués d'apport colluvial vertiques	Sur matériau de texture fine - P ≤ 8% - N/NO - RU : 185 mm	densité du cèdre : 95% - bien venant déperissement faible < 5%
Rendzines dolomitiques	Sur blocs et cailloux discontinus - P ≤ 5% - replat - RU : 15 mm	densité du cèdre : 70% - bien venant déperissement faible < 5% (malgré RU faible)
Sols Fersiallitiques	Sur argile rouge - profond (>100ccm) - P ≤ 8% - E - RU : 140 mm	Densité du cèdre faible : 20% déperissement important : ~ 50%
	Sur blocs de dolomie ou de calcaire lacustre - profond (>100ccm) - P ≤ 8% - O	densité du cèdre : 95 % - bien venant - déperissement nulle
	Sur argile rouge et blocs de cailloux dolomitiques - profond : 60cm - P < 5% - N/NE - RU : 134 mm	densité du cèdre : 80% - bien venant - déperissement faible : < 5%
	Sur calcaire lacustre - 1% < P ≤ 2% - replat - SO - RU : 114 mm	Densité faible : 40% - mal-venant Déperissement : 25%

L'analyse du comportement du cèdre en rapport avec les caractéristiques physico-chimiques et hydriques des sols permet de proposer une classification de la sensibilité au dépérissement schématisée dans le *tableau 6*.

Tableau 6. Classes de sensibilité au dépérissement du cèdre				
Caractéristiques stationnelles	Classes de sensibilité au dépérissement			
	(I) Sensibilité nulle	(II) Sensibilité faible	(III) Sensibilité moyenne	(IV) Sensibilité élevée
RU (mm)	>150	100 - 150	50 - 100	<50
Substrat	Argile, basalte	Blocs et cailloux de dolomie discontinus	Sable	Dolomie massive
Sable 30 - 60 cm (%)	0 - 20	20 - 40	40 - 60	>60
CaCO ₃ 30 - 60 cm (%)	0 - 10	10 - 25	25 - 50	>50
Pente (%)	0 - 5	5 - 10	10 - 25	>25
Exposition	N - W - NW	NE - SW	-	S - E - SE

L'encadré 6 ci-après présente un résumé des résultats et acquis.

Encadré 6. Méthode et matériel de l'analyse du sol et la nutrition minérale des arbres

- Inventaire, description et caractérisation physico-chimiques des 14 unités de sols, fertilité (texture, CaCO_3 , NPK) et nutrition minérale (N, P, K, Ca, Mg, Na).
- La majorité des sols de la zone présentent une composition minérale correcte (absence de carences) : le dépérissement n'est pas lié à un déficit en éléments minéraux.
- Caractérisation et suivi du régime hydrique des sols (HE, RU).
- La relation (HE) et $\Sigma (A+L)$ est $\{HE = 0,33(A+L) + 7,45 ; R^2 = 0,86\}$.
- La capacité de rétention augmente quand la somme des fractions (argile et limon) augmente.
- L'humidité équivalente diminue avec la profondeur du sol.
- Au niveau (0 - 30 cm), 96% des stations ont une HE $\geq 30\%$, très élevée, (teneurs de MO élevées en surface).
 - Au niveau (60 - 90 cm), HE $\leq 20\%$, pour la majorité des sols.
 - Le dépérissement est lié au régime hydrique du sol.

En conclusion, le dépérissement du cèdre, dans cette zone est lié au régime hydrique qui dépend essentiellement de la RU. Les relations de cause à effet suivantes schématisent ces liaisons :

- Dépérissement # F [régime hydrique] (1).
- Régime hydrique # F [substrat (Argile, basalte, blocs de dolomie, discontinus, dolomie massive) ; exposition ; pente ; teneur du sable total au niveau 30 - 60 cm ; teneur en CaCO_3 au niveau 0-30 cm ; réserve en eau utile (RU)] (2).
- Réserve en eau utile (RU) # F [profondeur d'enracinement ; humidité équivalente ; pourcentage de la terre fine ; densité apparente du sol] (3).

Et montrent que le dépérissement du cèdre est un phénomène multidimensionnel qui ne peut être expliqué par un seul ou deux facteurs. Néanmoins, plus le nombre de paramètres défavorables est grand, plus le taux de dépérissement du cèdre est élevé.

3.4 Analyse et diagnostic entomologiques

L'Analyse entomologique (M. Mouna 2008) se propose de faire un diagnostic sur les arbres en cours de dépérissement, pour mieux appréhender l'identification et la connaissance des insectes intervenant dans ce phénomène. La méthodologie adoptée consiste à travailler sur le terrain, dans les placettes retenues pour l'échantillonnage, sur des classes d'arbres. Cinq classes sont définies, à partir des indices de présence des xylophages sur les troncs en partant de l'arbre sain (classe 0)

jusqu'à l'arbre mort (classe 4) en passant par les trois classes intermédiaires qui caractérisent les arbres à trois stades successifs de dépérissement.

L'échantillonnage, principalement destructif sur les classes de dépérissement consiste à couper deux rondins de 40 cm de longueur sur chaque arbre abattu. Un des deux rondins est écorcé au laboratoire et le deuxième gardé en élevage dans un éclosir en bois (dimensions : 50/40 cm). Les racines prélevées de ces arbres abattus, sont aussi écorcées et examinées au laboratoire sous la loupe binoculaire. Le feuillage, les rameaux et les branches des arbres des trois classes de dépérissement et des arbres sains ont été examinés de près et notamment, une fois l'arbre au sol pour détecter la présence de phytophages. *L'encadré 7* présente un résumé de la méthode et du matériel utilisé. Les résultats principaux de cette analyse sont résumés ci-après:

Le premier résultat de cette analyse consiste en l'élaboration d'une liste regroupant les principaux insectes inféodés au cèdre au Maroc (*tableau 6*).

Cette liste indique la partie de l'arbre attaquée et l'état phénologique actuel des insectes sur le terrain dans le Moyen-Atlas. Un code à 7 caractères est proposé pour chaque espèce d'insecte, suivant les normes européennes en vigueur.

Seuls les insectes phytophages et xylophages, strictement inféodés au cèdre au Maroc sont présentés ici (*Tableau 7*). Parmi ces insectes, il y a des ravageurs confirmés et d'autres potentiels.

Nous avons en effet classé antérieurement, *Scythiques wagonnet* (*Cooptera, Curculionidé*) parmi les ravageurs phytophages potentiels dont les ravages étaient assez fréquents sur cèdre, notamment à Azrou, au cours de l'été 2006.

Encadré 7. Méthode et matériel de l'analyse entomologique (Résumé)

1. Classes de dépérissement

Le choix des classes de dépérissement, (classe (0) : arbre sain à classe (4) : arbre mort) a été fait sur le terrain, en tenant compte des dégâts et symptômes des différents organes de l'arbre comme le montre le tableau ci-après

Organes	Dégâts et symptômes	Indice de présence
Aiguilles et rameaux	Aiguilles consommées Taille anormale	Nom de l'insecte et stade de développement
Branches et Tronc	Trous de pénétration ou de sortie d'insectes xylophages sur des écorces encore lisses Repérage difficile ou impossible des traces de xylophages sur les branches et troncs à écorce rugueuse	Elevages dans des éclosiers au laboratoire pour obtenir et connaître l'adulte de (ou des) l'insecte (s) en question
Racines	Présence d'insectes sur l'écorce Trous de pénétration des xylophages ou galerie sous l'écorce	Identification du ravageur ou élevage en éclosiers au laboratoire

Les observations portent sur des symptômes visibles jugés anormaux (coloration anormale des aiguilles et déficit foliaire) et sur la présence des insectes sur les troncs des arbres et sur les racines (indice de présence) dans les classes (1 ; 2 et 3). Au cours de chaque sortie, trois arbres ont été coupés (un arbre par classe de dépérissement) dans chacune des deux zones d'étude : Ait Youssi et Azrou. Un total de 36 arbres a été abattu au cours des six sorties effectuées.

2. Matériel d'étude

Le feuillage, les rameaux et les branches sont examinés de près sur place, et des photos de ces différentes parties de l'arbre ont été prises sur l'arbre au sol.

Sur chaque arbre abattu deux rondins d'environ 40 cm de longueur sont coupés (12 rondins au total par sortie). 6 des 12 rondins prélevés sont écorcés au retour du terrain et examinés sous la loupe binoculaire pour caractériser et quantifier l'importance des dégâts des insectes responsables et leurs stades de développement.



Les dimensions des rondins (hauteur, périmètre et diamètre) sont mesurées. La surface ravagée par les insectes xylophages, sur le rondin est mesurée, au cours de l'écorçage, à l'aide d'un mètre pour avoir une idée sur l'importance des dégâts des xylophages. Cette surface, située en général au niveau du cambium et du liber, peut atteindre dans certains cas l'aubier. Des photos de chaque classe de dépérissement sont prises au fur et à mesure des écorçages et notamment en ce qui concerne les symptômes, les dégâts d'insectes, leurs stades de développement, etc... Les premiers stades de développement larvaires, rencontrés au cours des écorçages, sont conservés dans l'alcool, alors que les stades les plus avancés sont gardés en élevage dans des bocaux en plastique transparent. Les racines des arbres abattus sont déterrées à l'aide d'une pioche et prélevées à la tronçonneuse. Ces racines sont écorcées et examinées au laboratoire sous la loupe binoculaire.

3. Elevages en éclosiers des insectes

Les 6 rondins restant sont mis dans des éclosiers en bois (dimensions : 50/40 cm) au laboratoire pour élevage et obtention des adultes d'insectes xylophages avec un bocal rempli d'eau pour y assurer une certaine humidité. L'éclosier est hermétiquement fermé par un couvercle percé au milieu par un trou dans lequel un autre bocal, en verre transparent, est enfoncé et muni à l'intérieur d'un entonnoir en papier percé à l'extrémité pour laisser pénétrer de la lumière dans l'éclosier et guider ainsi l'insecte sortant vers cette issue.

4. Identification des insectes

La majorité des insectes adultes inféodés au cèdre ont été d'abord identifiés par comparaison dans les collections de référence du Muséum National d'Histoire Naturelle à l'Institut Scientifique et vérifiés, au besoin, ultérieurement par des spécialistes.



Tableau 7 : Liste des principaux insectes du cèdre au Maroc et leur état actuel dans le Moyen Atlas (2007)

Ordre	Famille	Code proposé	Nom latin	Partie attaquée	Etat actuel
Lepidoptera	<i>Thaumetopoeidae</i>	<i>Thaubon</i>	<i>Thaumetopoea bonjeani</i> Powell	Aiguilles	Latent
	<i>Thaumetopoeidae</i>	<i>ThauPIT</i>	<i>Thaumetopoea pityocampa</i> Denis & Schif	Aiguilles	Latent
	<i>Tortricidae</i>	<i>Acleund</i>	<i>Acleris undulana</i> Wals.	Aiguilles de l'année	Latent
	<i>Tortricidae</i>	<i>Epinced</i>	<i>Epinotia cedricida</i> Diak.	Aiguilles	Latent
	<i>Tortricidae</i>	<i>EpinALG</i>	<i>Epinotia algeriensis</i> Cham.	Aiguilles	Latent
	<i>Pyralidae</i>	<i>Diorpey</i>	<i>Dioryctria peyrimhoffi</i> De Joannis	Inflorescences mâles	Latent
	<i>Pyralidae</i>	<i>Diorpel</i>	<i>Dioryctria peltieri</i> De Joannis	Cônes femelles	Latent
Homoptera	<i>Lachnidae</i>	<i>Cedrlap</i>	<i>Cedrobium laportei</i> Rem.	Extrémités des rameaux	Latent
	<i>Lachnidae</i>	<i>Cinaced</i>	<i>Cinara cedri</i> Mim.	Extrémités des rameaux	Latent
	<i>Torymidae</i>	<i>Megapin</i>	<i>Megastimus pinsapis</i> Hoffmeyer	Graines	Latent
Coleoptera	<i>Chrysomelidae</i>	<i>Lupepar</i>	<i>Luperus pardoi</i> Codina	Aiguilles	Latent
	<i>Curculionidae</i>	<i>Scytwar</i>	<i>Scythropus warioni</i> Mars.	Aiguilles de l'année	Latent
	<i>Curculionidae</i>	<i>Magdleu</i>	<i>Magdalis leucopleura</i> Fairm.	-	Latent
	<i>Curculionidae</i>	<i>Larispp</i>	<i>Larinus</i> spp.	-	Latent
	<i>Scolytidae</i>	<i>Scolnum</i>	<i>Scolytus numidicus</i> Bris.	-	Latent
	<i>Scolytidae</i>	<i>Scolcar</i>	<i>Scolytus carpini</i> Ratzeburg	-	Latent
	<i>Scolytidae</i>	<i>Cryppic</i>	<i>Cryphalus piceae numidicus</i> Ei.	-	Latent
	<i>Scolytidae</i>	<i>Crypced</i>	<i>Crypturgus cedri</i> Erchh.	-	Latent
	<i>Scolytidae</i>	<i>Kissnov</i>	<i>Kissophagus novaki</i> Reitter	-	Latent
	<i>Scolytidae</i>	<i>Phloced</i>	<i>Phloesinus cedri</i> Bris.	-	Latent
	<i>Scolytidae</i>	<i>Xylesax</i>	<i>Xyleborus saxeseni</i> Ratz.	-	Latent
	<i>Scolytidae</i>	<i>Hylubon</i>	<i>Hylurgops bonvouloiri</i> Chapp.	-	Latent
	<i>Scolytidae</i>	<i>Hylabat</i>	<i>Hylastes batnensis</i> Bris.	-	Latent
	<i>Buprestidae</i>	<i>Phaemar</i>	<i>Phaenops marmottani</i> Frm.	-	gradation
	<i>Buprestidae</i>	<i>Anthnig</i>	<i>Anthaxia nigrifula</i> Ratz.	-	Latent
	<i>Buprestidae</i>	<i>Anthple</i>	<i>Anthaxia pleuralis</i> Fairm	-	Latent
	<i>Buprestidae</i>	<i>Anthsep</i>	<i>Anthaxia sepulchralis</i> Fab.	-	Latent
	<i>Buprestidae</i>	<i>Anthmar</i>	<i>Anthaxia marmottani</i> Brisout	-	Latent
	<i>Buprestidae</i>	<i>Anthsal</i>	<i>Anthaxia salicis</i> F.	-	Latent
	<i>Buprestidae</i>	<i>Anthcho</i>	<i>Anthaxia chobauti</i> Abeille	-	Latent
	<i>Buprestidae</i>	<i>Anthcor</i>	<i>Anthaxia corsica maroccana</i> Scharf	-	Latent
	<i>Buprestidae</i>	<i>Anthlud</i>	<i>Anthaxia ludovicæ</i> Abeille	-	Latent
	<i>Buprestidae</i>	<i>Buprfla</i>	<i>Buprestis flavangulata</i> Frm.	-	Latent
	<i>Cerambycidae</i>	<i>Callced</i>	<i>Callidium cedri</i> Peyerh.	-	Latent
	<i>Cerambycidae</i>	<i>Ergafab</i>	<i>Ergates faber</i> L.	-	Latent
	<i>Cerambycidae</i>	<i>Semarus</i>	<i>Semanotus russica algerica</i> F.	-	Latent
	<i>Cerambycidae</i>	<i>CERAMYC</i>	Gen. spp.	-	Latent
	<i>Bostrychidae</i>	<i>Stepqua</i>	<i>Stephanopachys quadraticollis</i> Mars	-	Latent

De même, l'impact sur le cèdre du xylophage *Phaenops marmottani* (Coptera, Buprestidé), était très insignifiant quelques années auparavant alors qu'actuellement, il participe activement au dépérissement du cèdre dans le Moyen Atlas. Il est vraisemblable que l'un ou l'autre des insectes, cités ci-dessous, soit un ravageur important pour l'arbre dans l'avenir. Ce tableau indique que la présence des insectes phytophages, sur le cèdre, est sporadique durant la période d'échantillonnage (novembre 2006 à juin 2007) et qu'aucun dégât important de ces insectes n'a été observé au niveau des placettes échantillons et un peu partout dans les forêts d'Azrou et d'Aït Youssi Amekla.

L'attention s'est alors portée sur le xylophage *Phaenops marmottani* (Coptera, Buprestidé), le plus fréquemment observé et obtenu sur les rondins écorcés et sur les arbres dépéris ou en cours de dépérissement sur le terrain (figures 9 et 10). En effet, les dégâts et symptômes de cet insecte existent sur les trois classes de dépérissement (classes 1, 2 et 3) et même sur les arbres morts (classe 4) dans toutes les placettes de prélèvement et ailleurs dans les massifs étudiés.

La réaction de l'arbre aux attaques de *P. marmottani* se caractérise, en général, par un écoulement de résine qui se consolide à l'endroit attaqué. Cette résine, de couleur ambrée plus ou moins foncée, s'échappe par les fissures du tronc et forme une sorte d'«auréole» entre l'écorce et l'aubier (Figure 9). Ce dernier est plus souvent déformé et présente une structure de nœud, ce qui contribue à la dépréciation du bois de l'arbre. La forme des galeries et surtout la sciure laissée par l'insecte sont toujours conservées dans la résine écoulée.

Les attaques de *P. marmottani* se localisent très souvent au niveau du liber et la nymphose s'effectue généralement au niveau de l'écorce dans une loge creusée par la larve au dernier stade (Figure 10).

L'insecte se nourrit, dans de rares cas, du cambium ou même d'une partie de l'aubier quand l'ensemble de l'écorce de l'arbre n'est pas très épais; la nymphose se fait alors dans une loge creusée dans l'aubier. La sortie de l'adulte du xylophage se repère au niveau de l'écorce par un trou ovale. Si la larve de *P. marmottani* est parasitée, le trou de sortie du parasite est, dans ce cas, de forme circulaire. *En effet, des parasites Ichneumonidae (Hyménoptères) ont été obtenus aux dépens du ravageur.*

Figure 9. Adultes de *P. marmottani* (flèches)



Figure 10. Localisation de la réaction de l'arbre (auréole entre l'écorce et l'aubier)



Les investigations et les analyses menées précisent que cet insecte est un xylophage primaire du fait qu'il attaque des arbres en bonne vitalité apparente, alors qu'il n'avait aucun effet sur le cèdre quelques années auparavant. Cet insecte n'avait, par conséquent, jamais attiré l'attention, ni des entomologistes, ni des forestiers, et sa biologie est restée très mal connue en dépit de sa description en 1868. Une appréciation des dégâts de *P. marmottani*, est présentée en taux de la surface attaquée sur des rondins coupés et écorcés.

Le tableau 8 présente le nombre d'attaques, le pourcentage de la surface attaquée et la classe de dépérissement.

Tableau 8. Importance des attaques de <i>P. marmottani</i> et classes de dépérissement							
placette prélèvement	Mois	Classe 1		Classe 2		Classe 3	
4. Ait Youssi	11/2006	0	0%	0	0%	6	5%
76. Boutrouba	11/2006	0	0%	8	8%	6	6%
6. Ait Youssi	12/2006	0	0%	7	4%	13	35%
62. Boutrouba	12/2006	0	0%	1	8%	6	7%
11. Ait Youssi	03/2007	4	2%	Indét	80%	Indét	80%
71. Boutrouba	03/2007	2	4%	3	1%	4	2%
9. Ait Youssi	04/2007	4	3%	8	19%	10	11%
71. Boutrouba	04/2007	4	4%	7	7%	3	11%
4. Ait Youssi	05/2007	0	0%	4	5%	3	9%
61. Azrou	05/2007	3	3%	3	4%	3	15%
11. Ait Youssi	06/2007	3	4%	4	3%	11	21%
74. Azrou	06/2007	0	0%	3	10%	6	5%
Moyenne par rondin écorcé		3	3%	5	13,5%	6	17%

Il faut noter que le choix des classes sur le terrain concorde avec l'importance du nombre d'attaques (auréoles) et le pourcentage de la surface attaquée des rondins correspondants. Les rondins des classes 2 et 3, prélevés au mois de mars, relatifs à Ait Youssi étaient attaqués sur les 4/5 de leur surface. Toutefois, aucun dégât n'a été rencontré sur les racines des arbres en cours de dépérissement. De même, des parasites *hyménoptères Ichneumonidae*, en cours d'identification au Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris, sont obtenus aux dépens du dernier stade larvaire de *P. marmottani*.

En conclusion, *P. marmottani*, dans le cas présent du dépérissement du cèdre dans le Moyen Atlas, semble être un ravageur primaire redoutable. Ses attaques sont suivies, en général, par une réaction de l'arbre traduite par un important écoulement de résine, au niveau de la zone de l'écorce attaquée, qui peut constituer *un indice précieux de présence du ravageur pour le gestionnaire sur le terrain*.

Néanmoins, à ce niveau de diagnostic, même avec la masse importantes données récoltées et analysées, la biologie de *Phaenops marmottani* reste encore mal connue. Les études sur cet insecte doivent se poursuivre pour cerner sa biologie et appréhender ses ennemis naturels parasites et sa phéromone sexuelle, ce qui faciliterait le développement d'un programme de lutte efficace à long terme.

L'encadré 8. ci-après présente un résumé des résultats et acquis.

Encadré 8. Résumé des résultats et acquis de l'analyse entomologique

- Inventaire et état actuel des insectes : *phytophages (12)* et *xylophages (27) inféodés au cèdre de l'Atlas au Maroc.*
- Feuillage, rameaux, branches : *Aucun signe important d'insectes phytophages au niveau des 4 classes de dépérissement.*
- Racines : *aucun signe de présence d'insectes ravageurs.*
- Fréquence et gradation du *xylophage Phaenops marmottani* sur les classes de dépérissement et sur les arbres morts :
- *Un ravageur primaire redoutable.*
- *Attaque les arbres en pleine vitalité.*
- *Participation active au phénomène de dépérissement.*
- *Indice de présence : écoulement de résine «auréole».*
- *Importance des attaques par rondin écorcé et par classe de dépérissement*
Classe 1 : 3 %; Classe 2 : 13%; Classe 3 : 17%



3.5 Inventaire dendrométrique et phytosanitaire

Un inventaire dendrométrique et phytosanitaire est réalisé (*M. Et-Tobi, 2008*) sur les 54 placettes du protocole d'échantillonnage unifié en vue d'estimer des paramètres dendrométriques des cèdres (sains, dépéris et morts), d'évaluer et d'analyser l'incidence des conditions écologiques et anthropozoïques en relation avec la distribution spatiale des dépérissements.

L'encadré 9 présente un résumé de la méthode et du matériel utilisé.

La compilation des données issues de cet inventaire a permis la constitution d'une base de données «arbre individuel», soit 1.059 arbres caractérisés chacun par 15 descripteurs, et d'une seconde base de données «placette», soit 54 unités-échantillons caractérisées chacune par 37 descripteurs écologiques, dendrométriques et phytosanitaires. Le traitement et l'analyse graphique et statistique de ces deux bases de données, ont permis de nombreux constats et diagnostics quant au comportement du phénomène de dépérissement et de mortalité du cèdre de l'Atlas dans la zone d'étude. Ces résultats sont résumés ci-après. La structure du peuplement des 1.059 cèdres secs, dépéris, et vifs (distribution du nombre total de tiges en fonction de la grosseur à 1,30 m du tronc) et celle des cèdres vivants (808 tiges) est caractérisé par un grand nombre de cèdres de petits

calibres et par un nombre restreint de gros bois, et semblent s'apparenter à la structure inéquienne spécifique des futaies d'âges multiples.

Encadré 9. Méthode et matériel de l'inventaire dendrométrique et phytosanitaire(Résumé)

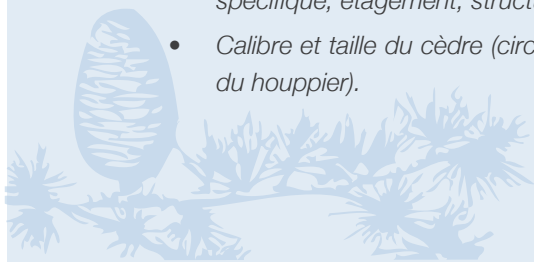
1. Protocole d'échantillonnage

Le protocole, validé lors de l'atelier du 29 septembre 2005, repose sur un type d'échantillonnage aléatoire simple probabiliste avec un échantillon de 54 placettes dont deux placettes témoins contenant des peuplements sains. La placette proposée, de forme circulaire, est de 30 mètres de rayon maximum. Les mesures et observations concernent tous les cèdres à l'intérieur des placettes. Une fiche de collecte des données est conçue à cet effet, de façon à faciliter la saisie et le traitement ultérieur par ordinateur. L'ensemble de ces placettes a été parcouru pour un prélèvement exhaustif de l'ensemble de l'information requise par quatre équipes d'inventaire formées, encadrées et supervisées sur le terrain par le consultant.

2. Inventaire dendrométrique du cèdre

L'inventaire dendrométrique concerne les descripteurs suivants :

- *Identification de la station,*
- *Paramètres du milieu physique (altitude, exposition, position topographique, pente, substrat, sol : type, profondeur, humus) ;*
- *Composition, consistance et structure du peuplement (couvert total, couvert spécifique, étagement, structure, stade de développement) ;*
- *Calibre et taille du cèdre (circonférence à 1,30 m, hauteur totale ; longueur du houppier).*



3. Inventaire phytosanitaire cèdre

Il s'agit d'évaluer l'état sanitaire général de l'arbre (parasites et autres dommages observés sur les cèdres). L'observation de l'état du houppier d'un arbre depuis le sol permet d'évaluer les principaux symptômes. A ce niveau, trois catégories de données sont relevés, en particulier les descripteurs relatifs à la vitalité et la santé du cèdre (écimage et ébranchage, déficit foliaire, décoloration...), la nature et la gravité des dommages observés sur le houppier, le fût et les branches, ainsi que le type de ravageurs ou parasite affectant le cèdre.

4. Traitements des données et présentations des résultats

L'état de santé d'une forêt est influencé par le milieu et la sylviculture appliquée. Ainsi, l'étude des interactions existantes entre les facteurs stationnels, sylvicoles (facteurs explicatifs) et l'état de santé des peuplements de cèdre (facteur à expliquer) implique une approche multidimensionnelle susceptible de mettre en évidence des gradations, des oppositions et des typologies permettant de dégager une série de facteurs actifs dans le processus. Compte tenu de la nature des observations (qualitatives et quantitatives), les données sont traitées par l'analyse factorielle des correspondances multiples (AFCM). Les propriétés et les fondements mathématiques de la méthode permettent de synthétiser aisément les structures multivariées.

5. Analyses et résultats

Les analyses et les résultats sont présentés (tableaux et graphes) et interprétés par classe homogène, unité de gestion forestière, par forêt puis à l'échelle de la zone d'étude. Ils concernent, en particulier : l'appréciation générale de la vitalité des peuplements, la détermination de la densité, surface terrière et volume de cèdre, l'évaluation de l'impact anthropique et de l'impact des bio-agresseurs sur l'état sanitaire du cèdre, du taux de dépérissement et de mortalité selon les paramètres sylvicoles, l'incidence écologique et sylvicole sur le dépérissement et la mortalité du cèdre.



Les classes 1, 2 et 3 qui totalisent 749 tiges (près de 71%), constituent un potentiel de tiges (Tableau 9) objets de stress et prédisposés à un éventuel passage à la classe 4 (mortalité). Cet aspect doit être pris en compte dans toute stratégie sylvicole concernant la réduction de l'intensité du stress causé au cèdre.

Classe d'évaluation	Appréciation (perte foliaire et/ou décoloration)	Nombre de cèdres	
0	0 à 5% de feuillage affecté	59	(5,6%)
1	6 à 25% de feuillage affecté	565	(53,4%)
2	26 à 50% de feuillage affecté	142	(13,3%)
3	Plus de 50% de feuillage affecté	42	(4,0%)
4	perte totale d'aiguilles	251	(23,7%)
Total		1059	(100)

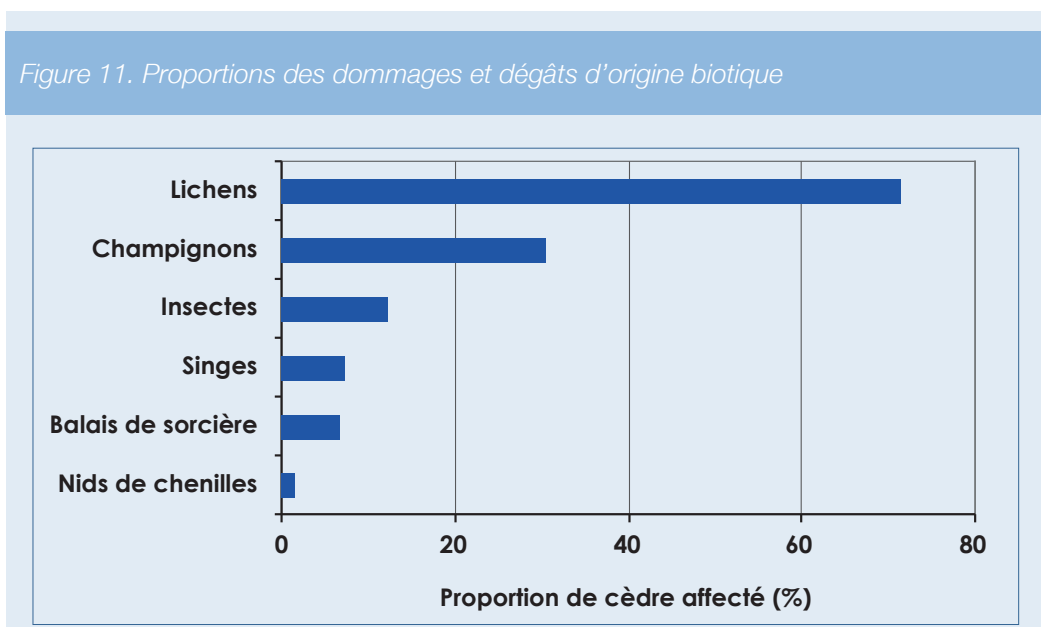
La longueur du houppier est considérée comme étant la partie verte d'un seul tenant de la masse foliaire d'un arbre. Ce paramètre est très important dans la mesure où la vigueur croît avec la longueur du houppier. La longueur relative du houppier [LH (%)] est obtenue par le rapport de la longueur du houppier à la hauteur totale de chaque arbre, exprimés dans les mêmes unités (mètre).

Le tableau 10 présente longueurs relative des houppiers de cèdre par classe de perte foliaire.

par classe de perte foliaire	Moyenne de la longueur relative du houppier LH (%)	Ecart-type de LH (%)	Nombre de tiges
0	55,01	20,87	59
1	47,09	18,49	565
2	43,95	19,38	142
3	49,22	20,32	42
Total	-	-	808

Le cèdre affiche ainsi une meilleure vitalité pour les longueurs relatives de houppier supérieures à 50%.

Les bio-agresseurs du cèdre observés dans la zone d'étude sont au nombre de 6 espèces (Figure 11).



Les lichens affectent l'essentiel des tiges recensées (71%), suivies des champignons (31%). Les balais de sorcière et les nids de chenille ne concernent respectivement que sur 7% et 2% de l'ensemble des cèdres. Les trous d'insectes ont été relevés sur 13% des tiges, et l'écorçage par le singe magot concerne 7,3% des tiges. Le singe exerce une nette dominance de l'écorçage de la cime, rarement les branches. L'importance de ces attaques est signalée au niveau des différents cantons, des classes de circonférences et des classes de déficit foliaire.

Le taux de mortalité et de dépérissement est variable suivant les cantons forestiers (Tableau 11). En effet, la mortalité est plus élevée dans le canton de Dayet Hachlaf Sud (43,6%), alors qu'elle ne dépasse guère 12% dans le canton de Ras Elma Nord. Le taux de dépérissement pour le canton d'Azrou enregistre la valeur maximum (28%), ce taux est voisin de 2,10% dans ce celui de Ras Elma Nord.

Tableau 11. Taux moyens de mortalité et de dépérissement (N/ha) par canton

Triage	Nbre de placettes	Taux moyen de mortalité (Nbre de tiges)	Ecart type	Taux moyen de dépérissement (Nbre de tiges)	Ecart type
Dayet Hachlaf Sud	10	43,60	28,27	17,70	14,18
Boutrouba	17	25,21	29,54	19,22	17,70
Ras Elma Sud	12	21,13	16,91	9,64	19,20
Ras Elma Nord	4	12,20	24,39	2,10	4,08
Azrou	11	7,18	7,43	28,15	14,58

L'intensité de l'impact anthropique sur le cèdre montre que près de 13% de l'effectif total inventorié est atteint de blessures et mutilations du tronc, et 4% fait l'objet de pratique d'ébranchage.

L'intensité de l'ébranchage concerne essentiellement les classes de grosseur s'étendant de 60 à 180 cm de circonférence. La gamme 40 à 120 cm regroupe l'essentiel des arbres blessés. L'ébranchage est rare ou très peu représenté dans les classes 0 (arbre vif) contrairement à la classe 1 (stade 1 de dépérissement).

Les taux de dépérissement et de mortalité sont appréhendés, aussi, à travers les caractéristiques des peuplements, en particulier : la structure du peuplement (stades de développement et proportion des classes d'âge), le taux de couvert, la composition du peuplement et l'importance du sous-étage.

Le taux de mortalité en nombre de tiges, en surface terrière et en volume affiche un gradient décroissant de la jeune futaie vers la haute futaie; *il semble que la mortalité concerne plus les sujets des peuplements n'ayant pas encore atteints la maturité.*

Selon le couvert, le taux de dépérissement est plus élevé dans les peuplements à couvert moyen (19% des tiges/ha), et plus bas (12%) quand le couvert est faible (C<40%).

Par contre, le taux de mortalité est plus élevé dans les peuplements dont le couvert dépasse 80% avec un gradient croissant des classes de couvert.

Tableau 12. Mortalité et dépérissement selon les gradients écologiques et dendrométriques

Gradient croissant de densité initiale ↓	GRADIENTS	Gradient croissant de conditions favorables ←					
		Milieu 3 (Basalte, sol profond)		Milieu 2 (Calcaire / dolomie; Sol peu profond)		Milieu 1 (Sol squelettique, calcaire, dolomie)	
		TD%*	TM%*	TD%	TM%	TD%	TM%
	Milieu X dendrométrie						
	Peuplement peu peuplé (1) 292 tiges/ha	4,72	7,24	25,42	9,82	1,67	40,00
	Peuplement intermédiaire (2) 381 tiges/ha	9,42**	39,61**	21,04	38,81	26,90	29,38
	Peuplement très peuplé (3) 708 tiges/ha	12,18	15,54	34,80**	15,22**	17,50*	5,00*

* TD% : Taux de dépérissement TM% : Taux de mortalité

L'incidence écologique et sylvicole sur le dépérissement et la mortalité du cèdre est appréhendée à travers l'exploitation des techniques statistiques d'analyse multivariée. Les différentes étapes (Tableau 12) ont chronologiquement permis d'identifier :

- Trois groupes de milieux échelonnés principalement selon un gradient de profondeur de sol et de couvert qui comprend les sols squelettiques, des sols peu profond et des sols profonds.
- Trois types de peuplement selon le caractère démographique qui répond convenablement à l'étude du dépérissement et des mortalités (292, 381 et 708 tiges/ha).
- Trois groupes de symptômes et dommages phytosanitaires marqués par les mêmes agents causaux mais qui diffèrent par leur gravité ou intensité.

En conclusion, l'analyse des différentes typologies obtenues a mis en relief des gradients qui permettent de conclure que le dépérissement et la mortalité s'aggravent à mesure que s'accroît le matériel sur pied et que parallèlement les conditions du milieu physique deviennent contraignantes.

Il ressort des analyses dendrométriques et phytosanitaires que le *facteur critique prédisposant les peuplements aux mortalités s'exprime à travers le couple «densité-régime hydrique» qui est largement conditionné par le couple «substrat-profondeur du sol»*

L'encadré 10 ci-après présente un résumé des résultats et acquis.

Encadré 10. Résumé des résultats et acquis de l'analyse dendrométrique et phytosanitaire

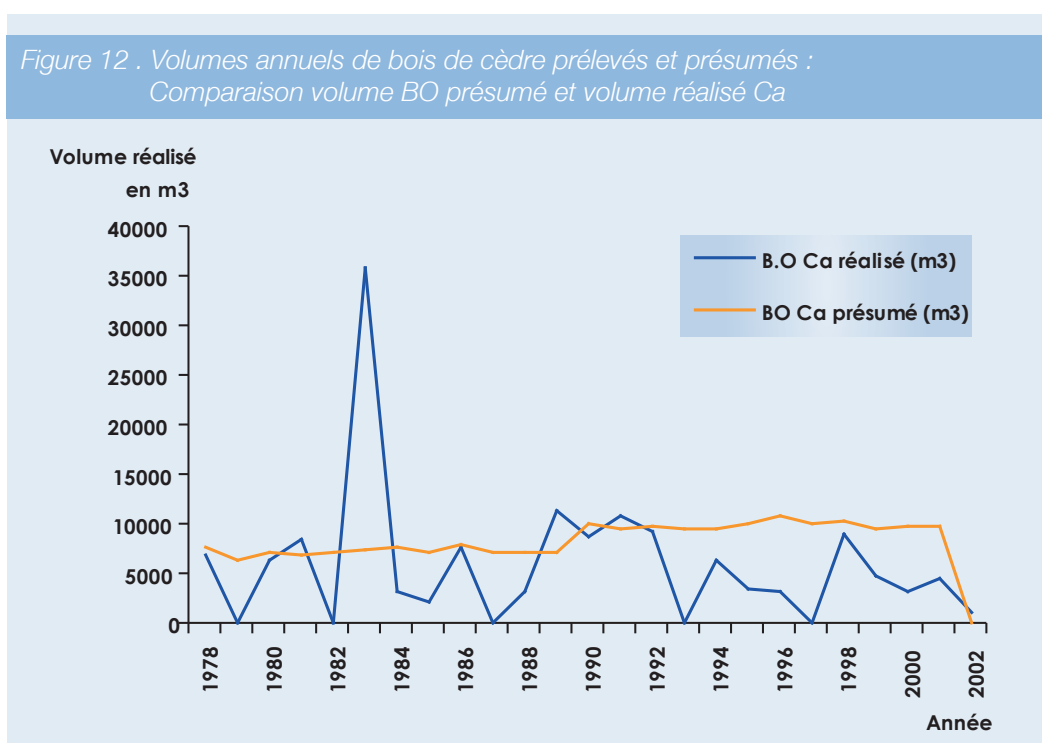
- La structure des peuplements (distribution du nombre total de tiges en fonction de la grosseur à 1,30 m du tronc) est irrégulière avec prédominance de petits bois pour les (1059) arbres sains, dépéris et secs et pour les (808) arbres sains.
- Les peuplements présentent une juxtaposition d'arbres de toutes les dimensions et de tous les âges.
- Les classes « 1, 2 et 3 », niveaux de déficit foliaire, totalisent près de 71% des arbres inventoriés et constituent un potentiel de tiges objet de stress et prédisposés à la mort.
- La longueur relative du houppier [LH (%)], s'est avéré un bon indicateur de la vigueur des arbres. Le cèdre affiche ainsi une meilleure vitalité pour les longueurs relatives de houppier supérieures à 50 %.
- Impact anthropique :
 - Ébranchage : maximum dans la classe «1» (6%).
 - Blessures et mutilations : toutes les classes (15% à 24%).
- Impact des bio-agresseurs.
 - Les arbres sains sont indemnes de nids de chenille.
 - Les classes «1, 2» sont marqués par la dominance des attaques de Mjej.
 - La classe «3» : présente une intensité importante des attaques d'insectes.
- Le taux de mortalité est plus élevé dans les peuplements dont le couvert dépasse 80%.
- Le dépérissement et la mortalité s'aggravent à mesure que s'accroît le matériel sur pied et que parallèlement les conditions du milieu physique deviennent contraignantes.
- Le couple «densité-régime hydrique», largement conditionné par le couple «substrat-profondeur du sol», constitue le facteur critique prédisposant les peuplements aux mortalités.



3.6. Analyse de la gestion antérieure des forêts

L'analyse critique de la gestion antérieure des forêts d'Azrou et d'Ait Youssi, au cours de la période 1978-2002, qui correspond à la durée d'application de leur plan d'aménagement, est réalisée à travers : le bilan des exploitations des produits ligneux et non ligneux, le bilan des travaux et de l'état de la régénération et l'importance des délits forestiers et du parcours. Cette analyse a permis de mettre en relief les contraintes d'ordre sylvicoles et anthropiques qui peuvent prédisposer les peuplements au phénomène de dépérissement. Les résultats principaux de cette analyse sont résumés ci-après.

La figure 12 présente les volumes annuels de bois de cèdre exploités durant la période d'aménagement (1978 - 2002)



Le volume de bois d'œuvre de cèdre prélevé s'élève à 148.449 m³, en deçà du volume total présumé réalisable par le plan d'aménagement, de l'ordre de 204.488 m³, soit un taux de réalisation de 73 %.

Cette différence entre les prévisions et les réalisations réside dans le fait que la régénération ne suit pas les coupes et que les exploitations de cèdre étaient relativement timides et ne concernaient que les arbres sénescents. Ces exploitations étaient concentrées sur les périodes 1983 à 1986 et 1994 à 2002.

Durant la période 2003-2007, qui correspond à la période de révision du plan aménagement, des coupes d'assainissement de cèdre ont pris une ampleur très importante. Ces coupes ont mis sur le marché une quantité de 42.072 m³ de bois d'œuvre et 11.861 stères de bois de feu de cette essence, soit plus de 20% des prévisions de l'aménagement.

Les produits non ligneux récoltés en forêt sont classés en trois catégories: le bois de service (perches, perchettes, et gaules), les matériaux (sable, humus, et pierre), les plantes aromatiques et médicinales (lichens, pyrèthre, fleurs d'aubépine...). Durant la période 1996-2002 le montant global généré, tout produit confondu, est de 1 896 200 DH, largement en deçà de leur valeur réelle. Ces produits peuvent avoir un impact positif sur l'amélioration des revenus des populations et sur la création d'emplois en milieu rural. Cependant, faute d'une organisation des prélèvements et des usagers, les quantités prélevées et, de surcroît, les revenus sont très variables d'une année à l'autre.

Les travaux de recherche sur le cèdre de l'Atlas, si nombreux soient-ils, n'ont pas résolu la totalité des problèmes posés par la régénération naturelle et les processus permettant de déclencher ce phénomène. Certes, les facteurs écologiques, pédologiques et biologiques ont été largement analysés, mais les techniques sylvicoles au même titre que le facteur social, n'ont pas fait l'objet d'études approfondies.

Par ailleurs, malgré la clôture des parcelles mises en régénération, la violation quasi permanente des mises en défens par une pléthore de troupeaux ovins demeure, entre autre, à l'origine des échecs. *Devant ce défi incontournable pour le moment, le recours à la régénération artificielle reste, malgré un coût élevé, la voie la plus sûre pour le rajeunissement des vieilles cédraies, de surcroît, déperissantes.*

Dans la forêt d'Azrou, les superficies régénérées durant la période de l'aménagement antérieur et celles prévues dans le plan de gestion sont mentionnées dans le *tableau 13*.

Tableau 13. Superficies réalisées en matière de régénération				
Série/Groupe	Régénération			Observations
	Superficies Proposées	Superficies Régénérées	Taux de Réalisation %	
Série 2: G. Régénération	992	974	98	Clôture à entretenir
Série 3: G. régénération G. amélioration	974 577	617 -	40 -	Clôture à entretenir
Série 4: G. Enrésinement	726	299	41	Réussite satisfaite
Série 5: G. Production	1079	250	23	Faible réussite
Série 6:	0	245	-	Echec, clôture à entretenir
Mélange séries 4, 5, 3, 1, 3		527	-	
Total	4 348	3 212	62	

Le taux de réalisation s'élève à 98 % dans la série de futaie régulière «à groupe de régénération élargie» et à 40% dans celle à «groupe de régénération stricte». Dans la chênaie verte, la superficie rajeunie est de 250 ha, soit un taux de réalisation de 23%. Ces travaux de rajeunissement des vieilles futaies et des vieux taillis, consistent en la réalisation des coupes à blanc étoc, suivies d'une mise en défens.

Dans la forêt d'Azrou, l'état de la régénération naturelle a été étudié en détail par le HCEFLCD (2006) qui a identifié trois grands ensembles (*tableau 14*). L'ensemble à régénération dynamique (255,09 ha) occupe les milieux favorables de la forêt et repose sur des sols basaltiques et carbonatés tendres; les peuplements de cèdre sont par endroits mélangés avec le chêne vert.

Dans l'ensemble à régénération moyenne à modérée, (2.491,9 ha), le degré de réussite de la régénération est fortement commandé par la nature du substrat. Les basaltes d'Ichh ou Harrouq et du plateau de Seheb sont plus favorables à l'installation du cèdre que les dorsales calcaires et dolomitiques qui recouvrent une partie importante de cette forêt. Toutefois, dans les milieux basaltiques, la densité du cèdre souvent élevée rend improbable l'installation des semis.

Tableau 14. Etat de la régénération naturelle dans la forêt d'Azrou			
Types de régénération	Etat de la régénération	Superficie (ha)	Taux de réussite (%)
Régénération naturelle	Régénération dynamique	255,09	1,43
	Régénération moyenne	2 491,90	13,99
	Régénération faible	6 873,82	38,60
Total		9 620,81	54,03
Régénération assistée	Régénération dynamique	921,00	5,17
	Régénération moyenne	459,00	2,58
	Régénération faible	813,00	4,57
Total		2 193,00	12,32

La compilation des données issues de cet inventaire a permis la constitution d'une base de données « arbre individuel », soit 1 059 arbres caractérisés chacun par 15 descripteurs, et d'une seconde base de données « placette », soit 54 unités-échantillon caractérisées chacune par 37 descripteurs écologiques, dendrométriques et phytosanitaires. Le traitement et l'analyse graphique et statistique de ces deux bases de données, ont permis de nombreux constats et diagnostics quant au comportement du phénomène de dépérissement et de mortalité du cèdre de l'Atlas dans la zone d'étude. Ces résultats sont résumés ci-après.

Les difficultés de régénération dans les peuplements de l'ensemble à régénération faible ou nulle (6.873,82 ha) sont dues à la conjonction de facteurs défavorables, à caractère écologique (substrat carbonaté), anthropique (surpâturage intense) et sylvicole (densité forte sur substrat basaltique).

Dans la forêt d'Aït Youssi (canton de Lalla Mimouna), l'ensemble des prélèvements, (2.277 m³ de bois d'œuvre, 2.788 stères de bois de feu de cèdre et 2 237 unités de perches), est en fait supérieur aux prévisions fixées dans le plan de gestion, qui sont de l'ordre de 1.500 m³ pour toute la forêt. Entre 2003 et 2007, les exploitations, qui concernent l'élimination de tous les arbres dépéris, ont mis sur le marché un volume total de 15.688 m³ de bois d'œuvre et 4.957 m³ de bois de feu de cèdre et 2.600 stères de bois de chêne vert.

Ainsi, le volume des exploitations, dans cette forêt, est anormalement élevé, suite aux coupes d'assainissement du cèdre ; il conduit à une baisse du capital sur pied en l'absence de mesures nécessaires pour assister le rajeunissement des peuplements. Un effort de régénération assistée, voire artificielle, est récemment envisagé pour rajeunir la forêt où la sénescence et le dépérissement des arbres menacent son avenir. Le service forestier local a réalisé, durant la campagne 2004 - 2005, 100 ha de reboisement de cèdre dans la parcelle 20; mais, le taux de réussite de ces plantations dépasse à peine 20 %.

Les délits forestiers communément constatés sont les délits de pâturage dans les mises en défens, des délits d'écimage, de coupes de bois vifs et d'adjudication. Les délits de coupes de bois vifs viennent en tête dans cette région où l'hiver est rude. Le nombre de délits de pâturage tient la seconde place et n'étonne pas devant le nombre excessif de têtes animales qui parcourent la forêt toute l'année. Les délits d'écimage sont subordonnés aux seconds et surviennent surtout pendant les chutes de neige en hiver.

Dans la forêt d'Azrou comme dans toutes les forêts du Moyen Atlas, l'élevage est la source principale de revenus pour les populations riveraines. Cette activité seconde l'agriculture de type vivrière dans cette région. La forêt est exploitée par des groupements ethniques appartenant principalement à la tribu d'Irklaouen qui pâturent sur environ 82 % de la superficie de la forêt. Quant aux fractions des Ihadrane et Ait Daoud de la tribu des Ait Mouli, elles utilisent 13 % de cette forêt. Les éleveurs étrangers d'origine d'Oulad Khaoua, installés sur le collectif de Seheb, en exploitent près de 5 % de parcours forestiers.

La forêt d'Aït Youssi comme c'est le cas pour les forêts voisines, est soumise à un élevage extensif très dense. Cet usage appartient à la tribu des Aït Saghrouchan du Kandar et particulièrement aux fractions d'Al Hajjaj, Ai Daoud ou Moussa et les Aït Nâamane qui exploitent respectivement, 71 %, 25 % et 4 % de ce massif.

La contribution de la forêt dans la production fourragère est de l'ordre de 53 % pour la forêt d'Azrou et de 28 % pour celle d'Aït Youssi. Toutefois, les parcours dans ces forêts connaissent un surpâturage excessif, ce qui a profondément modifiés les équilibres pastoraux et engendré un appauvrissement des parcours et un arrêt du dynamisme régénérateur des écosystèmes. Encore plus que la forêt d'Azrou, le degré de surpâturage avoisine 87 % dans le massif d'Aït Youssi (fraction d'Aït Daoud ou Moussa).

Cette situation explique d'ailleurs les nombreuses violations des mises en défens et les pratiques d'écimage

L'analyse critique de la gestion antérieure des forêts d'Azrou et d'Ait Youssi au cours de la période 1978-2002, a permis de mettre en relief les contraintes d'ordre sylvicoles et anthropiques qui peuvent prédisposer les peuplements au phénomène de dépérissement.

L'encadré 11, ci- après, présente un résumé des résultats et enseigne

Encadré 11. Résumé des résultats et acquis de l'analyse de la gestion antérieure des forêts

- *Le taux des réalisations du matériel sur pied, de l'ordre de (78%) dans la forêt d'Azrou, est en deçà des prévisions de l'aménagement ce qui entraîne un surstockage du matériel ligneux par endroit.*
- *Le volume des exploitations est anormalement élevé, (plus trois fois les prévisions de l'aménagement) dans la forêt d'Ait Youssi. Suite aux coupes d'assainissement du cèdre ce qu'il conduit à une baisse du capital sur pied en l'absence de rajeunissement des peuplements.*
- *L'état de la régénération assistée est hétérogène. Au niveau de toute la forêt, 42 % de la surface traitée fournit des résultats satisfaisants.*
- *Les difficultés de régénération sont dues à la conjonction de facteurs défavorables, à caractère écologique (substrat carbonaté), anthropique (surpâturage intense) et sylvicole densité forte sur substrat basaltique).*
- *L'action anthropique est relativement forte, (surpâturage, écimages, coupes de bois vif) avec une incidence négative sur la structure et le fonctionnement de l'écosystème (dégradation du milieu, et de la biodiversité) et sur la dynamique des peuplements ; elle prédispose, de surcroît, les arbres au stress et au dépérissement.*
- *La régénération artificielle par plantation du cèdre est prometteuse. Toutefois, elle nécessite un grand effort de recherche, en vue de mettre au point les techniques appropriées de reboisement de cette essence (standard d'élevage des plants en pépinière, techniques de préparation du sol et suivi des jeunes plantations).*
- *La mobilisation des produits non ligneux récoltés en forêt est faible en raison du manque d'organisation des prélèvements et des usagers. Les quantités prélevées et, de surcroît, les revenus sont très variables d'une année à l'autre.*

Les études thématiques multidisciplinaires réalisées sur la base d'un protocole d'échantillonnage unifié, ont permis de décrire pour mieux comprendre et évaluer l'impact des différents facteurs écologiques, anthropiques et sylvicoles pris isolément sur la santé des peuplements de cèdre, mais aussi d'appréhender la complexité de leurs relations. Ces études convergent quant aux facteurs discriminants du phénomène de dépérissement des cédraies étudiées qui doivent orienter dans le futur les stratégies de protection et de gestion de ce type de forêt. Ces facteurs sont en rapport avec les éléments suivants:

- ⊙ **L'importance des modifications climatiques des trois dernières décennies:** climat à tendance plus xérique, sécheresse récurrente, longueur de la période sèche.
- ⊙ **Le tempérament délicat du cèdre :** forte évapotranspiration, besoins en eau excessifs. opportunisme sur le plan hydrique.
- ⊙ **Le régime hydrique des sols de la zone :** action déterminante du substrat et de la topographie sur le bilan hydrique du sol.
- ⊙ **Le type de sylviculture pratiquée :** action prépondérante de la densité et du couvert, et de la composition des peuplements.
- ⊙ **L'action anthropique :** incidence négative du surpâturage, de l'écimage et coupes de bois sur la structure et le fonctionnement de l'écosystème.

En conclusion, les sécheresses récurrentes associées à l'absence d'une sylviculture permettant d'équilibrer la densité et la structure des peuplements forestiers aux disponibilités hydriques des sols et aux conditions écologiques des habitats sont à l'origine du dysfonctionnement des peuplements du cèdre. Ce déséquilibre a amplifié l'effet du stress hydrique sur des arbres se développant notamment aux niveaux des situations défavorables (sols superficiels sur pentes et expositions chaudes) conduisant, ainsi, au dépérissement des arbres et des peuplements.

4. Les synthèses : Etude des relations «santé des peuplements - station - sylviculture - symptômes et dommages phytosanitaires»

4.1 Gestion et organisation de la base des données

L'analyse précédente a permis de décrire pour mieux comprendre et évaluer l'impact des différents facteurs écologiques, anthropiques et sylvicoles, pris isolément sur la santé des peuplements de cèdre, mais aussi d'appréhender la complexité de leurs relations. La recherche d'une approche globale, qui met en jeu cause et effets, c'est-à-dire facteurs stationnels, sylvicoles et état de santé des peuplements, est alors nécessaire.

Pour ce faire, les données relatives à la zone d'étude en rapport avec les dépérissements de la cédraie, sont intégrées au Système d'Information Géographique, élaboré à cet effet, selon leur format cartographique ou alphanumérique et structurées comme suit:

- ⊙ **Données cartographiques de la forêt d'Azrou :** cartes des types de peuplement réalisées lors de l'aménagement des forêts; cartes des dépérissements (émanant des données des descriptions parcellaires et ceux d'inventaire; cartes des facteurs topographiques, notamment, l'altitude, l'exposition et la pente.
- ⊙ **Tables attributaires :** Outre les tables des attributs des cartes, les données descriptives stationnelles, écologiques et celles relatives au dépérissement sont rattachées aux stations d'études. Ces informations sont identifiées dans le Système d'Information Géographique par les numéros des placettes d'observation.

- ⊙ **Modélisation et structuration des données** afin de permettre leur traitement en respectant les éléments suivants: la génération des surfaces par classe de dépérissement; l'élaboration de la carte de sensibilité du cèdre aux dépérissements qui servira comme support cartographique pour identifier les actions d'intervention future.
- ⊙ **Elaboration des cartes thématiques** possibles à partir de la base de données.

Du fait que toutes les données collectées sont alphanumériques et sont présentées soit sous format Excel ou sous forme de tableaux Word, il a été jugé nécessaire de les transformer en une base de données Access. Les tables de cette base de données sont importées à la base de données géospatiales d'ArcGIS et liées en considérant le schéma conceptuel de la base de données.

L'exploitation des résultats des études thématiques (*Chap. 3*) a permis en premier lieu :

- ⊙ La levée de la redondance constatée pour certaines variables relevée lors des analyses thématiques (variables collectées par deux ou plusieurs thématiques: cas des mesures dendrométriques, topographiques, réserve hydrique).
- ⊙ L'élimination des variables à faible variance pour les variables quantitatives ou à forte dominance : une modalité ou classe pour les variables qualitatives.
- ⊙ L'élimination des variables démontrant l'absence de carences en éléments nutritifs (analyse du sol et du feuillage).
- ⊙ La hiérarchisation et le choix des variables à fort pouvoir discriminant par l'élimination des variables sans pertinence écologique.

Selon les thématiques et la nature des mesures, trois catégories de données sont identifiées:

- ⊙ Données à portée spatiale systématique (support spatial de collecte des données), elles concernent les thématiques « inventaire et sciences des sols).
- ⊙ Données à portée ponctuelle dans l'espace (support individuel de collecte portant sur des individus arbres au sein de quelques placettes d'échantillonnage), elles touchent les thématiques « écophysiologie et entomologie».
- ⊙ Données à portée spatio-temporelle (support de la collecte de l'information porte sur des individus arbres dans quelques placettes d'échantillonnage et des séries climatiques de longue durée). Elles concernent la thématique « dendrochronologie, bioclimatologie».

Les données à portée spatiale systématique constituées par les données de l'inventaire et de la pédologie sont fusionnées puis réparties selon l'affinité thématique en 4 groupes, en l'occurrence:

- ⊙ Un groupe de variables de structure écologique ou considérées comme telles, qui expriment les conditions de croissance.
- ⊙ Un groupe de variables de structure dendrométrique, qui sous-entendent les conditions de concurrence et de compétition (problème d'espace vital de croissance).

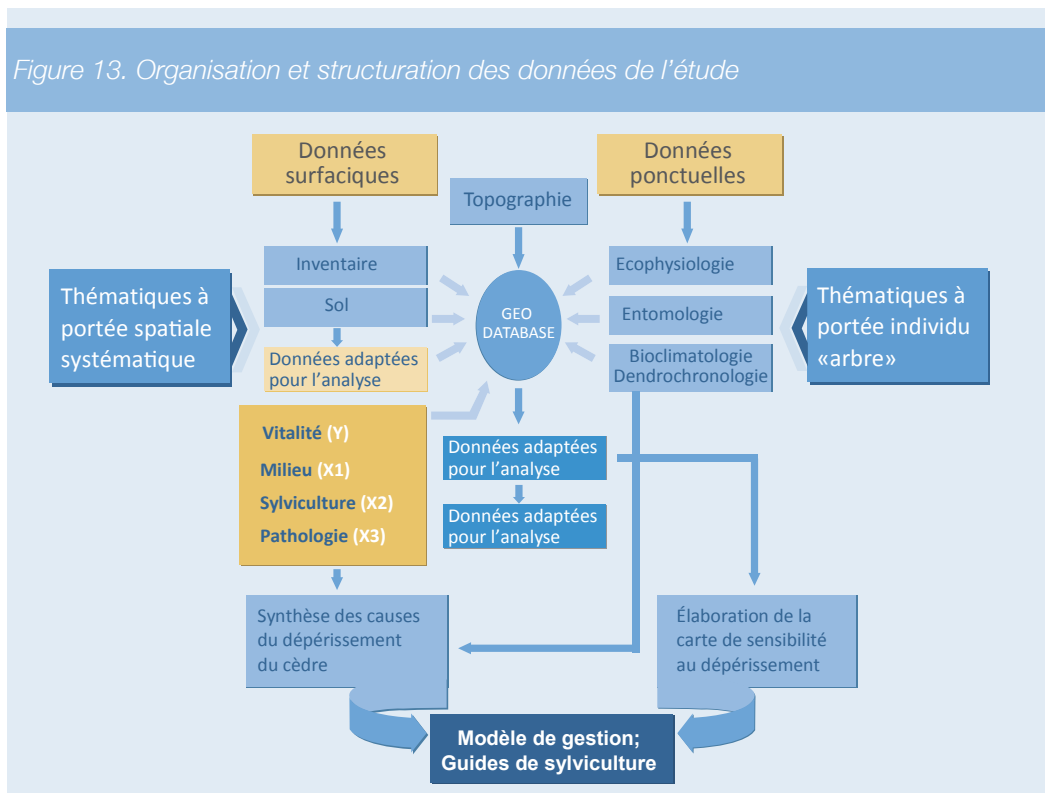
- Un groupe de variable de structure symptomatique traduisant l'intensité des dégâts et dommages phytosanitaires et anthropiques affectant les arbres de cèdre.
- Un groupe de variables de structure de santé de la forêt qui exprime la vitalité des arbres (morts, dépéris, vigoureux).

Ce dernier groupe constitue la « structure à intérêt direct » de l'étude qu'on cherche à expliquer alors que les trois premiers groupes sont considérés comme des structures à rôle explicatif pouvant renseigner ou apporter de l'explication aux différents états de santé de la forêt.

Les données de ces quatre groupes sont traitées par l'analyse factorielle des correspondances multiples (AFCM) moyennant une transformation et un codage adéquat des variables.

Les données relatives aux thématiques «écophysiologie, entomologie et dendrométrie-climatologie», qui n'ont touché que des mesures ou observations sur des arbres dans un nombre restreint de placettes, sont utilisées en données auxiliaires pour appuyer l'interprétation des structurations et des typologies qui vont émerger dans le cheminement de l'analyse.

La figure 13. présente un schéma simplifié de l'organisation et de la dérivation des données pour les différentes analyses proposées.



La liste des variables et leur codification sont présentées dans l'encadré 12.

Encadré 12. Liste des variables et leur codification

Caractéristiques	Modalités	
I. variables de santé /vitalité		
Taux de mortalité (%)	0 ; 0-25 ; 25-50 ; >50	(4)*
Taux de dépérissement (%)	0 ; 0-20 ; 20-40 ; 40-66	(4)
Taux de vitalité (cèdre sain) (%)	0-25 ; 25-50 ; 50-75 ; 50-75	(4)
II. Variables du milieu		
Profondeur du sol (cm)	0-30 cm ; 0-60 cm ; 0-90 cm	(3)
Taux d'argile (%)	0-25 ; 25-50 ; >50	(3)
Taux de limon (%)	0-25 ; 25-50 ; >50	(3)
Taux de sable (%)	0-25 ; 25-50 ; 50-75 ; >75	(4)
Réserve Utile en eau du sol (mm)	0-50 ; 50-100 ; 100-150 ; >150	(4)
Taux de calcaire actif (Caco3) (%)	0 ; 0-10 ; 10-40 ; 40-60 ; >60	(5)
Altitude (m)	1600-1700 ; 1700-1800 ; 1800-1900 ; >1900	
Exposition	N ; S ; E ; W ; NENW ; SESW	
Pente (%)	0-5 ; 5-20 ; 20-35 ; > 35	(4)
Position topographique	Haut versant ; Mi versant ; Bas versant ; Replat	
Substrat géologique	Basalte ; Dolomie calcaire ; Calcaire	
Couvert forestier (%)	0-30 ; 30-50 ; 50-75 ; > 75	(4)
Structure forestière	Perchis ; Jeune futaie ; Haute futaie	(3)
III. Variables sylvicoles		
Densité totale (N/ha)	0-100 ; 100-250 ; 250-500	(4)
Surface terrière totale (m ² /ha)	0-20 ; 20-40 ; 40-60	(3)
Volume total (m ³ /ha)	0-100 ; 100-250 ; 250-500 ; 500-750 ; > 750	(5)
Densité de cèdre Vif (N/ha)	0-50 ; 50-150 ; 150-250 ; 250-500	(4)
Surface terrière de cèdre vif (m ² /ha)	5-15 ; 15-25 ; 25-50 ; > 50	(4)
Volume de cèdre vif (m ³ /ha)	0-50 ; 50-250 ; 250-500 ; > 500	(4)
Densité de cèdre Sec (N/ha)	0 ; 0-50 ; 50-150 ; > 150	(4)
Surface terrière de cèdre sec (m ² /ha)	0 ; 0-5 ; 5-15 ; 15-25	(4)
Volume de cèdre sec (m ³ /ha)	0 ; 0-50 ; 50-150 ; > 150	(4)
Densité de cèdre dépéris (N/ha)	0 ; 0-50 ; 50-100 ; 100-200 ; > 200	(5)
Surface terrière de cèdre dépéris m ² /ha)	0 ; 0-5 ; 5-15 ; > 15	(4)
Volume de cèdre dépéris (m ³ /ha)	0 ; 0-50 ; 50-100 ; > 100	(4)
IV. Symptômes phytosanitaires		
Ebranchage	0 ; 0-2 ; 2-5	(3)
Blessures et mutilations	0 ; 0-5 ; > 5	(3)
Ecorçage du singe	0 ; 0-5 ; > 5	(3)
Nids de chenille	0 ; 1 ; > 1	(3)
Mjej	0 ; 0-5 ; 5-15 ; > 15	(3)
Lichens	0-2 ; 2-5 ; 5-10 ; 10-20 ; > 20	(5)
Insectes	0 ; 0-2 ; 2-5 ; > 5	(3)
Balais de sorcière	0 ; 0-2 ; 2-5 ; > 5	(4)

* Nombre de modalités de chaque variable

4.2 Typologie et identification des classes de santé du cèdre

Dans les placettes-échantillons, l'état de santé de la forêt est exprimé par l'intermédiaire de la densité des arbres rapportée à l'hectare et répartie selon leur vigueur. Ainsi, trois états de vigueur sont identifiés :

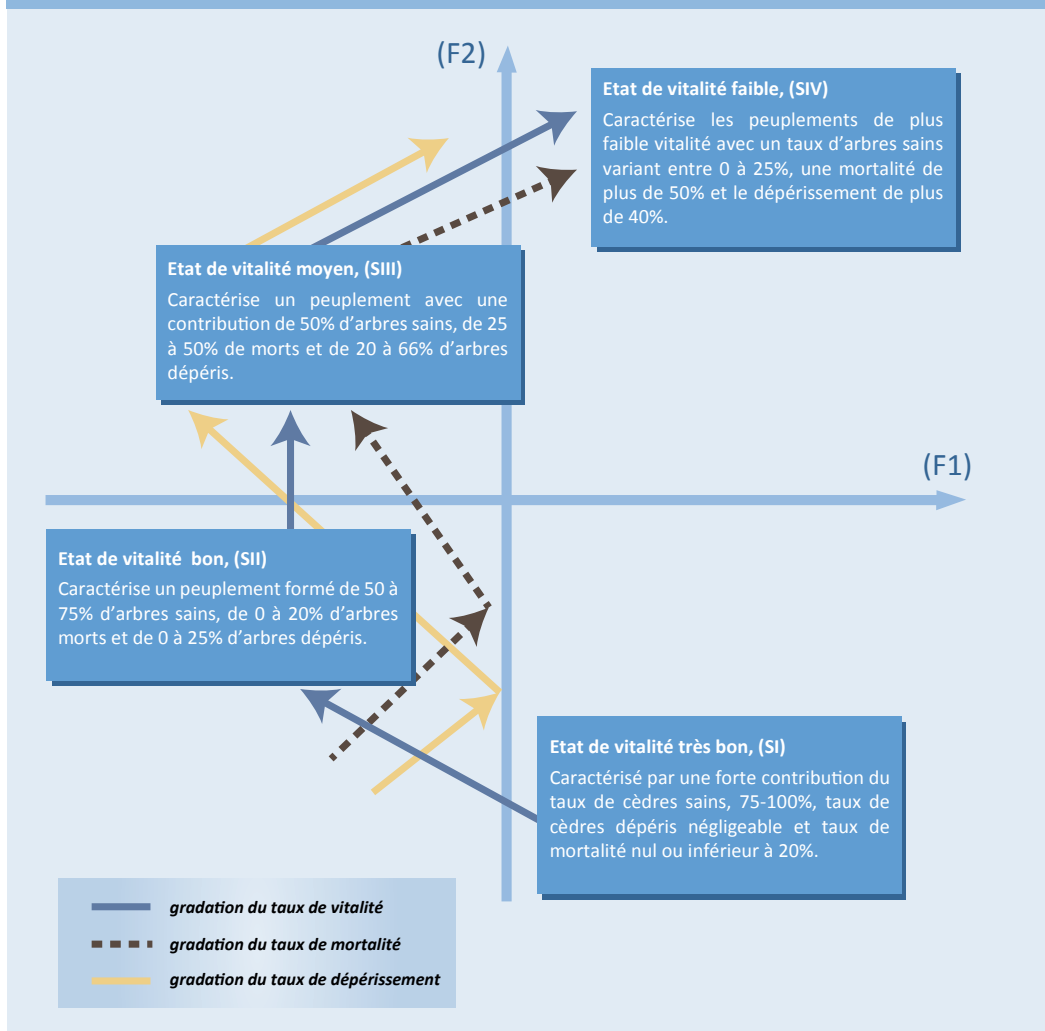
- Taux des arbres dépérissant.
- Taux des arbres morts.
- Taux des arbres sains.

L'AFCM sur le tableau disjonctif complet, formé de 54 lignes (placettes) et de 12 colonnes modalités des trois variables (*encadré 13*), donne la configuration structurale consignée dans la figure de projection des lignes et des colonnes sur les cartes factorielles formées par le premier et le second axe factoriel de l'analyse.

La projection des placettes sur ces cartes permet de mettre en évidence 4 groupes de parcelles discriminées sur la base de similitude de comportement vis-à-vis des modalités des différentes variables. La projection de ces modalités sur le même plan factoriel permet de caractériser et de porter une description à chaque groupe de parcelles. (*Figure 12*). La description de cette structure montre l'identification de quatre états de vitalité du cèdre (*tableau 15*):

Tableau 15. Description de la typologie des états de santé du cèdre			
Etats de sante du cèdre	Taux moyen	Nombre de parcelles	Liste des parcelles
Vitalité S1 : peuplements bien venants, vigoureux Taux d'arbres sains (75 à 100%) Taux d'arbres morts (0% et 0-20%) Taux d'arbres dépéris (0, 0-20%)	88% 4% 8%	16	B77, B62, B81, Z118, RS47, Z119, B71, RN6, RS45, RS40, Z117, B61, RN18, B59, RS28, RN12.
Vitalité S2 : peuplements en bon état de santé Taux d'arbres sains (50 à 75%) Taux d'arbres morts (0-20%) Taux d'arbres dépéris (0-20%)	66.8% 13.2% 20%	13	Z94, RS50, Y16, Z87, RS44, B68, B54, RS38, Z100, Z95, Y10, Z110, Z120.
Vitalité S3 : peuplements de vigueur moyenne Taux d'arbres sains (0 à 50%) Taux d'arbres morts (25 à 50%) Taux d'arbres dépéris (20 à 66%)	47% 30% 23%	17	Y20, Y9, Y6, B73, Y18, RS37, Z106, Z93, RN3, RS29, RS36, RS48, B53, B69, RS51, Y23, B56.
Vitalité S4: (peuplements de vigueur faible) Taux d'arbres sains (0 à 25%) Taux d'arbres morts (50 à 100%) Taux d'arbres dépéris (40 à 66%).	15% 67% 18%	8	B74, Y11, B57, B63, Y3, B76, B55, Y4.
Total des placettes -échantillons		54	

Figure 14. Typologie des états de santé des peuplements de cèdre ; 54 placettes et 12 modalités de variables (Plan factoriel (1 ; 2))



Le passage de l'état de peuplements bienvenant et vigoureux à l'état de peuplements de faible vigueur montre une dépréciation de la santé du cèdre exprimée par un double gradient où la baisse du taux de contribution du nombre d'arbres sains s'accompagne d'une augmentation des taux d'arbres dépéris et morts (figure 14), Ainsi, le taux moyen des arbres sains passe de 88% à 15%, le taux moyen des arbres dépéris passe de 8% à 18% alors que le taux des arbres secs passe de 4 à 67%.

4.3 Typologie des stations écologiques : incidence écologique sur le dépérissement et la mortalité du cèdre

La matrice de données analysées par l'AFCM est constituée de 54 placettes en lignes et 50 modalités des variables en colonnes en codage disjonctif complet (*encadré 13*). L'exploitation des résultats de cette analyse repose sur l'examen de nombreux indicateurs statistiques :

- ⊙ *Les rapports de corrélation* entre chaque variable et chaque facteur de l'AFCM pour juger de la valeur discriminante de chaque variable et de l'importance de chaque facteur dans la discrimination et la typologie.
- ⊙ *La projection des placettes* sur le plan factoriel pour en réaliser une classification en groupes ayant une grande similitude.
- ⊙ *La projection des modalités* des différentes variables en vue de décrire les groupes issus de la classification des placettes.

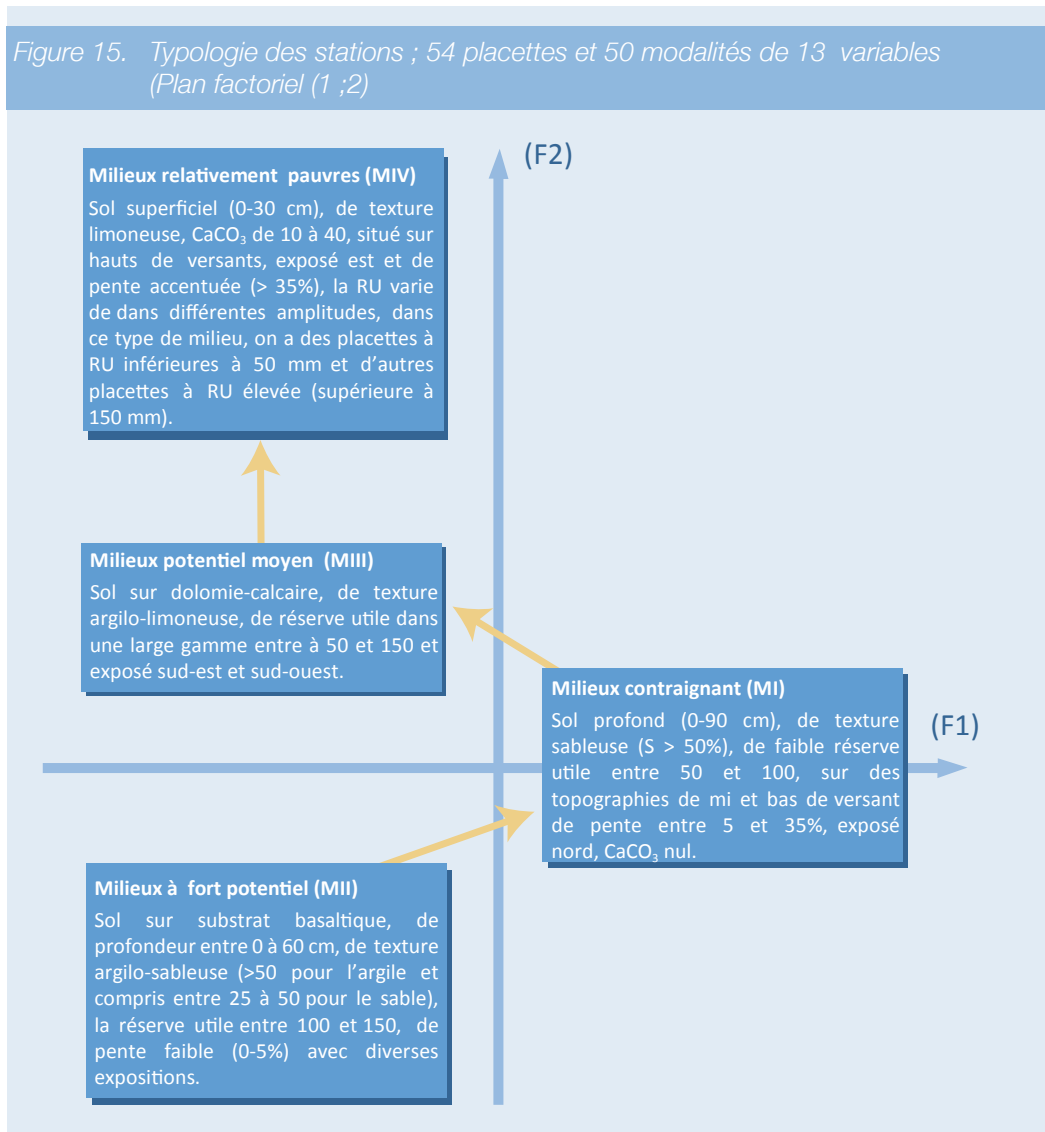
Les rapports de corrélation (*tableau 16*) montrent que le premier facteur exprime un complexe de variables liées à la texture du sol, sa profondeur, la réserve hydrique, le CaCO₃, la pente et la position topographique. Ce facteur exprime donc une structuration en relation avec le bilan hydrique dont la variabilité est intimement liée à la texture, la profondeur, la topographie et la pente.

Tableau 16. Matrice des rapports de corrélation entre les variables et les 2 premiers facteurs de l'AFCM

Variables \ Facteurs	F1	F2
Taux d'argile	0.758	0.127
Taux de limon	0.570	0.2.48
Taux de sable	0.906	0.027
Réserve hydrique	0.532	0.170
CaCO ₃	0.578	0.485
Position topographique	0.350	0.309
Pente	0.318	0.207
Profondeur du sol	0.349	0.531
Altitude	0.064	0.435
Exposition	0.141	0.379
Recouvrement de la végétation	0.067	0.297
Strate de végétation	0.106	0.009
Substrat	0.000	0.262

Le Facteur 2, fortement lié à la profondeur du sol, au substrat, au couvert, au CaCO₃, à la pente, à l'exposition, à l'altitude et à la topographie semble traduire le problème de compensation entre les variables physiographique et biotique (couvert végétal) avec les ressources hydriques (impacts sur l'atténuation ou l'aggravation de l'érosion hydrique et de la dégradation de la structure des sols).

La figure 15 présente les projections de tous les éléments lignes (54 placettes) et les colonnes (50 modalités des 13 variables) sur les plans formés des deux premiers axes factoriels.



Dans ce diagramme, quatre types de milieux sont discriminés suivant le niveau de potentialités, caractérisées par un descriptif écologique spécifique :

- Milieux à fort potentiel.
- Milieux à potentiel moyen.
- Milieux pauvres.
- Milieux contraignants.

4.4 Typologie des peuplements forestiers

Cette analyse a pour but d'individualiser les types de peuplements selon le caractère de vitalité (vif, sain, dépris) de l'échantillon à travers leurs principales caractéristiques dendrométriques, notamment la densité, la surface terrière et le volume de bois (*Encadré 13*).

La matrice soumise à l'AFCM est composée de 54 placettes en lignes et 39 modalités relatives aux 9 variables en colonnes (les variables densité totale, surface terrière totale et volume total, étant des totaux déductibles des autres variables, ne sont pas incluses dans l'analyse).

Les rapports de corrélation (*tableau 17*) montre que Le premier facteur est fortement lié aux états de santé des cèdres sec et dépris ; il discrimine les stations sur la base de la variabilité des valeurs de densité, de surface terrière et de volume relatives au cèdre secs et dépris.

Variables \ Facteurs	F1	F2
Densité de cèdre Sec (N/ha)	0.383	0.254
Surface terrière de cèdre sec (m ² /ha)	0.425	0.275
Volume de cèdre sec (m ³ /ha)	0.473	0.073
Densité de cèdre dépris (N/ha)	0.585	0.229
Surface terrière de cèdre dépris (m ² /ha)	0.682	0.056
Volume de cèdre dépris (m ³ /ha)	0.686	0.015
Surface terrière de cèdre vif (m ² /ha)	0.118	0.746
Volume de cèdre vif (m ³ /ha)	0.226	0.727
Densité de cèdre Vif (N/ha)	0.069	0.713

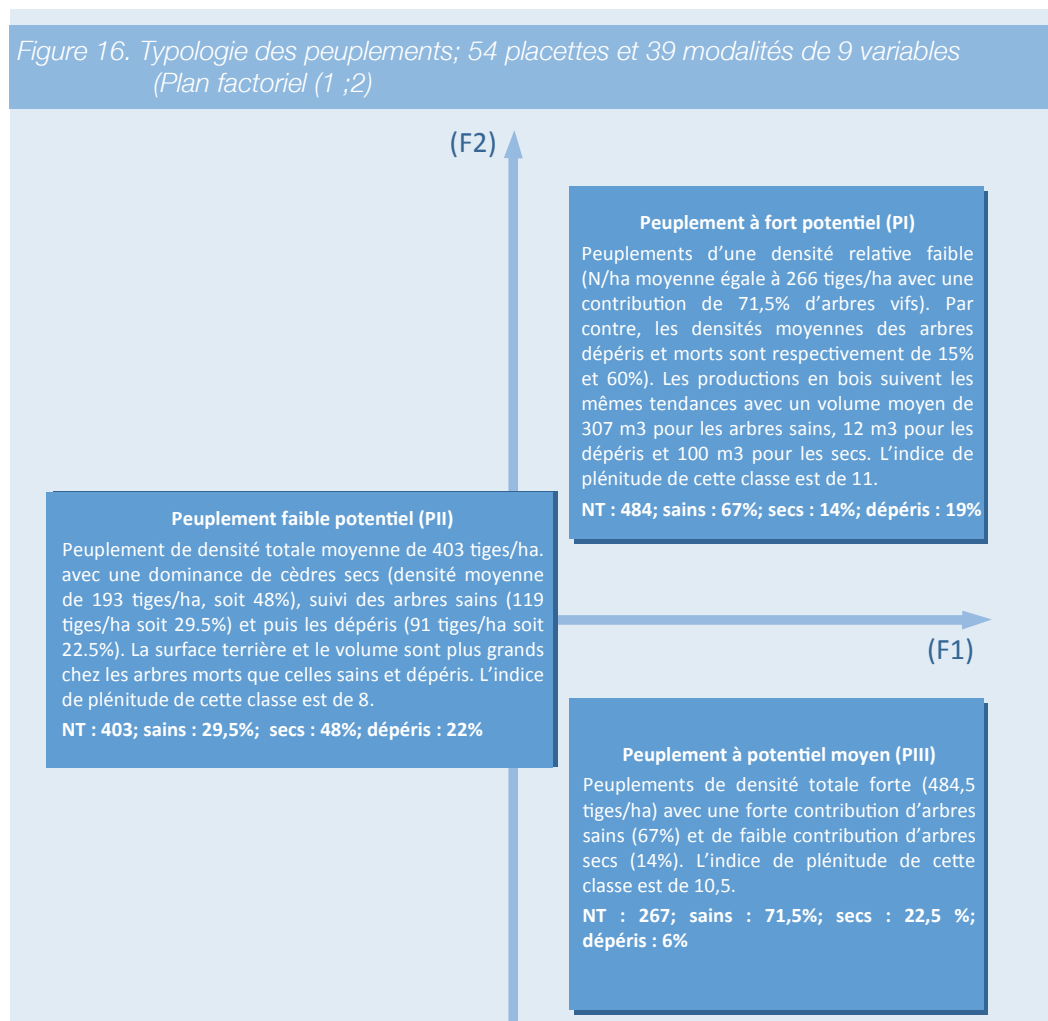
Le second facteur lié au cèdre sain, différencie entre les placettes sur la base de la variabilité des variables mesurées sur les arbres sains.

La configuration de cette structure dendrométrique est donnée par les représentations graphiques, sur la *figure 14*, des projections des placettes et des modalités des variables dendrométriques dans les plans factoriels formés les deux premiers facteurs de l'AFCM.

Selon la même démarche précédente, l'analyse des nuages des points passe par l'examen des proximités des placettes et leur tendance à s'agréger en groupes d'une part et la proximité des modalités et leur tendance à se regrouper en combinaison de classes des différentes variables d'autre part. La confrontation des deux plans factoriels formés par le premier et le deuxième axe permet de faire la description structurale de cette composante «dendrométrique». Ainsi, l'analyse a permis d'identifier trois Types de peuplements (*figure 16*).

4.5 Typologie des symptômes et dommages phytosanitaires

Cet aspect de l'étude a pour but l'analyse de la répartition et/ou l'association des diverses agressions d'origine anthropique et biotique au sein des peuplements étudiés. 8 variables sont prises en considération dans la recherche de cette structure symptomatique (Encadré 13). La matrice des données formée de 54 placettes en ligne et de 29 modalités en colonnes issues des 8 variables observées est analysée par l'AFCM.



La configuration de la structure à base des signes symptomatiques est donnée par la projection des placettes et des modalités des variables (Figure 17) sur les plans factoriels de l'AFCM.

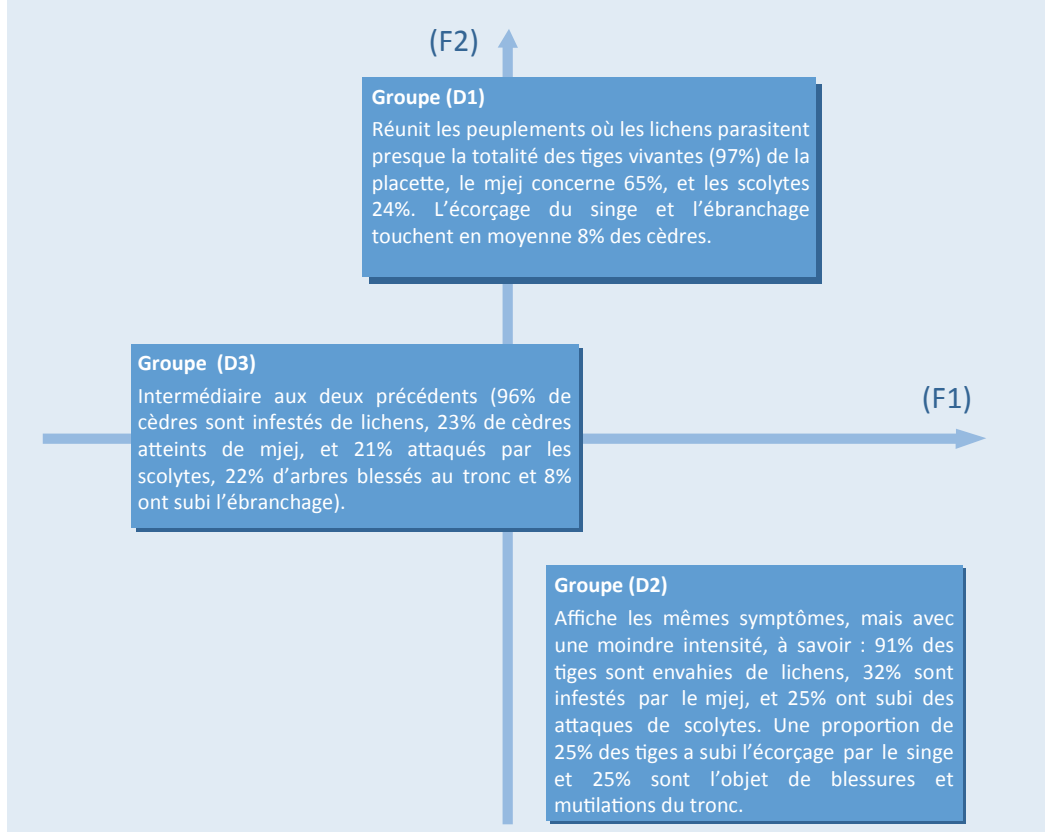
La matrice des rapports de corrélation entre variables et facteurs de l'AFCM (tableau 18) montre que le premier facteur discrimine les placettes sur la base de 5 variables à savoir le nombre d'arbres écorcés par le singe, le nombre d'arbres Blessés, le nombre d'arbres avec du Mjej, le nombre d'arbres portant des Balaies de sorcière et le nombre d'arbres couverts parasités par les lichens.

Tableau 18 : Matrice des rapports de corrélation entre les signes \pathologiques et les deux premiers facteurs de l'AFCM.

Variables \ Facteurs	F1	F2
Ecorçage par le singe	0.54	0.05
Blessure	0.51	0.28
Balaie de sorcière	0.62	0.27
Mjej	0.66	0.54
lichens	0.73	0.60
Nids de chenilles	0.16	0.26
Insectes	0.04	0.28
Ebranchage	0.03	0.35

Le second facteur discrimine les parcelles sur la base des actes d'ébranchage, de la présence du Mjej et des arbres parasités par les lichens, et secondairement du nombre d'arbres où sont observés des chenilles et des insectes.

Figure 17. Typologie des caractéristiques symptomatiques des dommages phytosanitaires, 54 placettes et 29 modalités de 8 variables sur le plan factoriel (F1, F2)



Il est évident que les trois groupes de parcelles décrits sont marqués par les mêmes symptômes et dégâts mais qui diffèrent par leur gravité ou intensité. A ce titre, rappelons que les pourcentages ont été calculés par rapport au nombre total de tiges de la placette, et la présence simultanée de divers agents ou dommages sur le même cèdre constitue un handicap à de nombreux commentaires.

Cependant, le groupe 1 (maximum de dégâts) ne concerne 8 placettes parmi 54 ; le groupe 2 (11 placettes) intermédiaire vient en seconde position. Le groupe 3 est le plus fréquent à travers le nombre de placettes (35) dans l'échantillon, mais il représente la plus faible intensité de dommages phytosanitaires. Le singe est assez bien actif dans le groupe 2 où il constitue les dégâts d'écorçage les plus importants. A l'exception de l'écorçage du singe, les groupes 1 et 2 sont pratiquement similaires.

Les dommages phytosanitaires, qui caractérisent chacune des classes cernées ci-dessus, dus aux attaques d'insectes sont confirmés par l'étude entomologique.

Ainsi, sur le terrain, des dégâts importants d'insecte phytophages sont observés au niveau du feuillage, des rameaux et des branches des arbres sains (classe 0) et des classes de dépérissement 1, 2 et 3, à l'exception de la présence de quelques nids de la processionnaire du pin (*Thaumetopoea pityocampa*) notamment dans les placettes 120 et 11. De même, des traces de présence insignifiantes de la processionnaire du cèdre (*Thaumetopoea bonjeani*) ont été aussi notées dans les placettes 6, 3, 12 et un peu partout dans les cédraies d'Azrou et d'Ait Youssi Amekla.

Sur les troncs, il a été noté la présence de symptômes de deux espèces d'insectes xylophages avec des fréquences différentes. En effet, les symptômes les plus fréquents sur les classes de dépérissement (1, 2 et 3) et sur les arbres morts (classe 4) sont ceux d'un coléoptère Buprestidae (*Phaenops marmottani*); alors que les traces d'un *Cerambycidae* (non identifié) sont plus rares.

Il semble donc que cet insecte pourrait éventuellement jouer un rôle dans le phénomène du dépérissement des cèdres dans le Moyen Atlas. Mais des questions fondamentales s'imposent à ce niveau: **Quel degré de responsabilité peut jouer *Phaenops marmottani* dans ce processus du dépérissement? Est une cause directe (facteur déclenchant)? Ou l'effet d'une cause qui survient en aval (facteur aggravant)?**

L'approfondissement de l'étude écologique et biologique de cette espèce par l'expérimentation et la recherche demeure le moyen recommandé pour apporter des réponses à ces questions.

4.6 Evaluation des apports explicatifs des variables écologiques sur dépérissement

Cette phase de l'étude consiste à mettre en relation les caractéristiques de santé des peuplements exprimées par la typologie sur les données (taux de mortalité, taux de dépéris et taux de sains) relevées dans les 54 placettes avec la combinaison des trois typologies élaborées des stations, des peuplements et des aspects phytosanitaires.

La démarche d'analyse adoptée se base sur la reconstitution deux tableaux de synthèse :

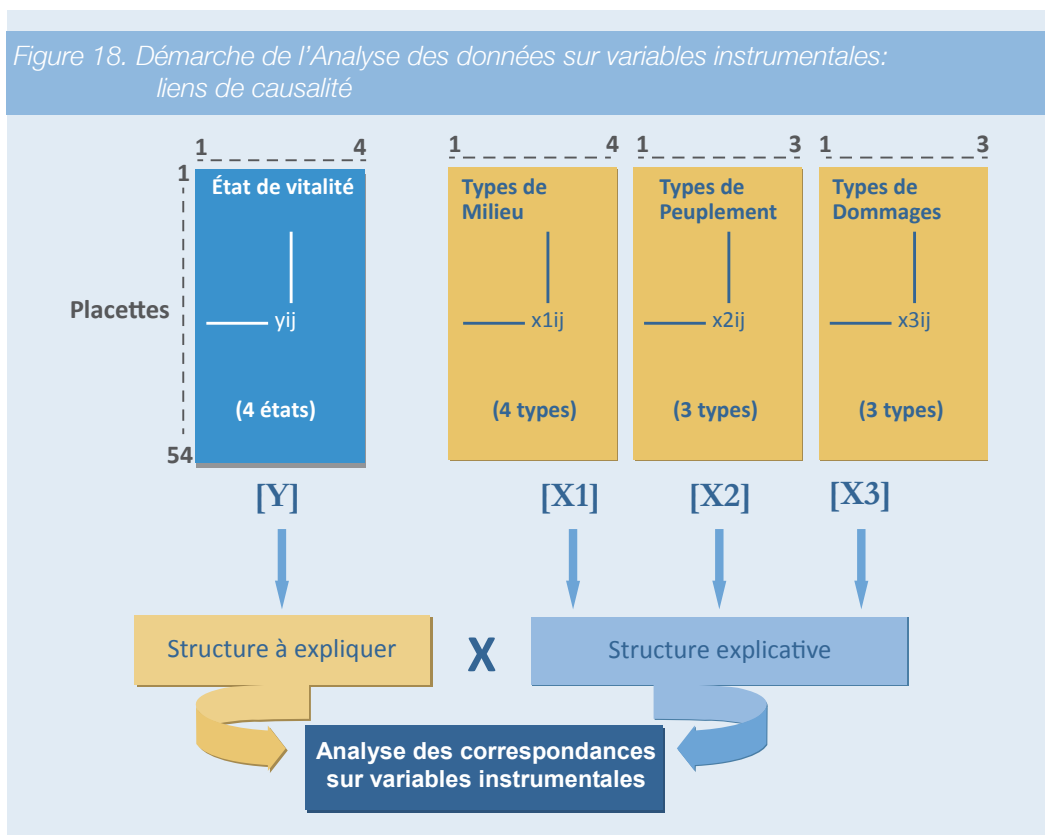
- ⊙ Le premier formé des 54 placettes en lignes et d'une seule colonne où chaque placette porte le code ou le numéro de la classe de son appartenance (classe de vigueur identifié par la typologie).

- Le second tableau, formé de 54 placettes d'échantillonnage en lignes et 3 colonnes correspondant chacune à l'une des trois typologies ; stations, peuplements et aspects phytosanitaires.

Chaque placette (ligne du tableau) porte ainsi un codage de trois indices correspondant chacun à son appartenance à chacune des trois typologies réalisées sur les trois thèmes.

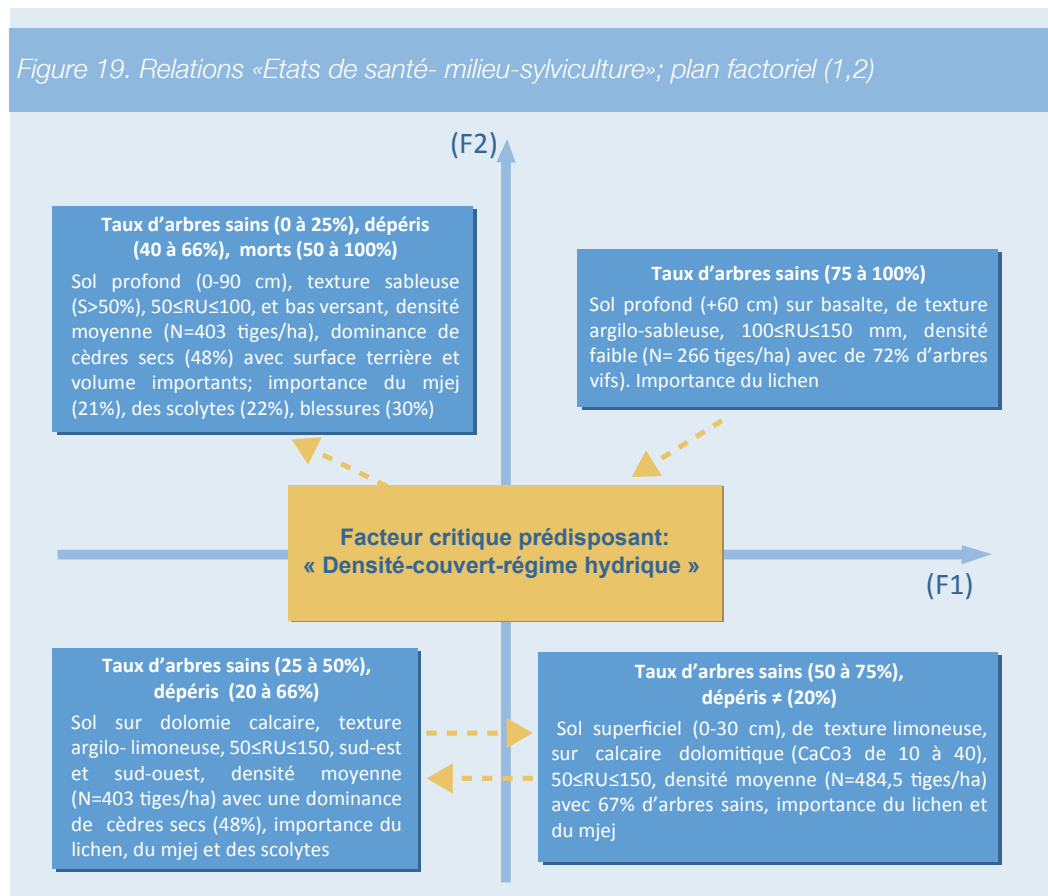
L'Analyse factorielle des correspondances sur variables instrumentales (AFCVI), méthode d'analyse de couple de tableaux, permet de réaliser une analyse sous contrainte expérimentale où la classe de santé dans chaque placette, sera considérée comme une performance de vitalité (structure à expliquer), réalisée dans des conditions de milieu de peuplement et d'intensité des dommages phytosanitaires considérées d'une manière simultanée (structure explicative jouant le rôle de contrainte expérimentale).

La figure 18 résume la démarche de l'Analyse des données sur variables instrumentales. L'AFCVI, réalisée sur ce couple de tableaux permet de dresser le bilan des relations entre l'état de vitalité du cèdre et les conditions écologiques stationnelles globales.



La recherche des causes du dépérissement du cèdre abordée dans cette étude selon une démarche expérimentale basée sur la multidisciplinarité, a permis d'établir une hiérarchie d'une série d'indicateurs qui renseigne sur ce phénomène.

Ces indicateurs, bioclimatiques, pédologiques, écophysologiques, dendrométriques, dendrochronologiques et pathologiques, ainsi que le produit de leur interaction explicités dans les résultats des analyses statistiques, montrent le caractère multivariable et multithématique des causes du dépérissement. La description des caractéristiques des types de biotopes pour chaque performance de vitalité du cèdre est présentée dans la *figure 19* qui met en relief les causes du dépérissement de la cédraie.



L'expression de l'état de vitalité du cèdre appréhendée selon la contribution des différents états de santé (taux des arbres sains, taux des arbres dépéris et taux des arbres secs) a permis une classification en quatre performances de vitalité (depuis l'état le plus sain à celui le moins sain), synthétisés dans le *tableau 19*. Cette expression a, par la suite, été confrontée aux différentes variables et facteurs de l'ensemble des disciplines mises en jeu pour restituer les causes de perte de vitalité du cèdre.

Tableau 19. Description des caractéristiques des types de biotopes pour chaque performance de vitalité du cèdre.

Etat de vitalité	Conditions de milieu	Structure dendrométrique	Intensité des dommages phytosanitaires
<p>Vitalité SI: (meilleur état)</p> <p>arbres sains (75 à 100%)</p> <p>arbres morts (0% et 0-20%)</p> <p>arbres dépéris (voisins de 0%)</p>	<p><u>Milieus à fort potentiel (MII)</u></p> <p>Substrat basaltique, sol de profondeur entre 0 à 60 cm, de texture argilo-sableuse (>50 pour l'argile et compris entre 25 à 50 pour le sable), la réserve utile entre 100 et 150, de pente faible (0-5%) avec divers expositions,</p>	<p><u>Peuplement à fort potentiel (PI)</u></p> <p>Peuplements d'une densité relative faible (NT moyenne égale à 266 tiges/ha avec une contribution de 71,5% d'arbres vifs). Par contre, les densités moyennes des arbres dépéris et morts sont respectivement de 15% et 60%). Les productions en bois suivent eux aussi les mêmes tendances avec un volume moyen de 307 pour les arbres sains, 12 pour les dépéris et 100 pour les secs. L'indice de plénitude de cette classe est de 11 (<u>meilleures densités</u>)</p>	<p><u>Groupe (DII)</u></p> <p>Les mêmes symptômes que P1, mais avec une moindre intensité, à savoir : 91% des tiges sont envahies de lichens, 32% sont infestés par le mje, et 25% ont subi des attaques de scolytes. Une proportion de 25% des tiges a subi l'écorçage par le singe et 25% sont l'objet de blessures et mutilations du tronc</p>
<p>Vitalité SII</p> <p>arbres sains (50 à 75%)</p> <p>arbres morts (0-20%)</p> <p>arbres dépéris (0-20%)</p>	<p><u>Milieus relativement pauvres (MIV)</u></p> <p>Sol superficiel (0-30 cm), de texture limoneuse, CaCO₃ de 10 à 40, situé sur hauts de versants, exposé est et de pente accentuée (>35%), la RU varie de dans différentes amplitudes, dans ce type de milieu, on a des placettes à RU inférieures à 50 mm et d'autres placettes à RU élevée (supérieure à 150 mm).</p>	<p><u>Peuplement à potentiel moyen (PIII)</u></p> <p>Le type de densité totale la plus forte (484.5 tiges/ha) avec une forte contribution d'arbres sains (67%) et de faible contribution d'arbres secs (14%). L'indice de plénitude de cette classe est de 10.5.</p>	<p><u>Groupe (DI)</u></p> <p>Peuplements où les lichens parasitent presque la totalité des tiges vivantes (97%) de la placette, le mje concerne 65%, et les scolytes 24%. L'écorçage du singe et l'ébranchage touchent en moyenne 8% des cèdres. Ce groupe (maximum de dégâts) ne concerne que 8 parcelles parmi 54.</p>

Tableau 19 (Suite). Description des caractéristiques des types de biotopes pour chaque performance de vitalité du cèdre

Etat de vitalité	Conditions de milieu	Structure dendrométrique	Intensité des dommages phytosanitaires
<p>Vitalité SIII</p> <p>arbres sains (0 à 50%)</p> <p>arbres morts (25 à 50%)</p> <p>arbres dépéris (20 à 66%)</p>	<p><u>Milieux potentiel moyen (MIII)</u></p> <p>Substrat dolomie calcaire, de texture argilo-limoneuse, de réserve utile dans une large gamme entre à 50 et 150 et exposé sud est et sud-ouest,</p>	<p><u>Complexe de peuplement (PII) et (PIII)</u></p> <p>Densité totale moyenne de 403 tiges/ha. Elle caractérise les peuplements avec une dominance de cèdres secs (densité moyenne de 193 tiges/ha, soit 48%), suivi des arbres sains (119 tiges/ha, soit 29.5%) et puis les dépéris (91 tiges/ha, soit 22.5%). La surface terrière et le volume sont plus grands chez les arbres morts que celles sains et dépéris. L'indice de plénitude de cette classe est de 8.)</p> <p>Le type de densité totale la plus forte (484.5 tiges/ha) avec une forte contribution d'arbres sains (67%) et de faible contribution d'arbres secs (14%). L'indice de plénitude de cette classe est de 10.5) (forte densité)</p>	<p><u>Groupe (DIII)</u></p> <p>96% de cèdres sont infestés de lichens, 23% de cèdres atteints de mje, et 21% attaqués par les scolytes, 22% d'arbres blessés au tronc et 8% ont subi l'ébranchage).</p>
<p>Vitalité SIV (médiocre état)</p> <p>arbres sains (0 à 25%)</p> <p>arbres morts (50 à 100%)</p> <p>arbres dépéris (40 à 66%)</p>	<p><u>Milieux contraignant (MI)</u></p> <p>Sol profond (0-90 cm), de texture sableuse (S > 50%), de faible réserve utile entre 50 et 100, sur des topographies de mi et bas de versant de pente entre 5 et 35%, exposé nord, caco3 nul,</p>	<p><u>Peuplement faible potentiel (PII)</u></p> <p>Densité totale moyenne de 403 tiges/ha. Elle caractérise les peuplements avec une dominance de cèdres secs (densité moyenne de 193 tiges/ha, soit 48%), suivi des arbres sains (119 tiges/ha soit 29.5%) et puis les dépéris (91 tiges/ha, soit 22.5%). La surface terrière et le volume sont plus grands chez les arbres morts que celles sains et dépéris. L'indice de plénitude de cette classe est de 8.</p>	<p><u>Groupe (DIII)</u></p> <p>96% de cèdres sont infestés de lichens, 23% de cèdres atteints de mje, et 21% attaqués par les scolytes, 22% d'arbres blessés au tronc et 8% ont subi l'ébranchage).</p>

4.7 Essai de synthèse et d'interprétation des relations fonctionnelles entre le dépérissement du cèdre et les conditions du milieu

L'analyse des données multidimensionnelle a révélé la prépondérance de certains facteurs dont les plus importants sont le substrat, la texture, la profondeur du sol, les pentes, la réserve utile en eau, la densité des peuplements, la topographie et les facteurs pathologiques. La combinaison de classes ou fourchettes de valeur des différentes variables a permis d'apporter une valeur explicative à chacune des 4 états de vitalité du cèdre. Or ces variables, n'agissent pas d'une manière individuelle, mais s'expriment d'une façon intégrées dans la structure et le fonctionnement de cet écosystème selon plusieurs mécanismes écologiques de compensation, de remplacement ou de déplacement.

Pour cerner les modalités d'interaction entre ces facteurs, on peut les ventiler en deux composantes, l'une statique l'autre dynamique. La composante statique concerne tous les caractères écologiques invariables ou peu variables dans le temps et que le gestionnaire ou l'aménagiste ne peut changer directement, en particulier, la topographie (altitude, pentes, expositions...), le sol (substrat, texture, profondeur), le climat (pluviométrie, température, évapotranspiration, enneigement ...). Par contre, la composante dynamique concerne tous les caractères qui sont variables dans le temps et que l'homme peut changer selon des scénarii pouvant contribuer à améliorer leurs efficacités, notamment la fertilité des stations, la structure des peuplements, les actions de conservations des eaux et des sols, les actions anthropiques, la lutte phytosanitaire.

Les actions des facteurs dynamiques, par les phénomènes de compensation, peuvent soit atténuer l'impact des facteurs statiques (les actions de conservation des sols peuvent améliorer le bilan hydrique sur une pente forte, des actions sylvicoles peuvent aussi réguler l'espace vital de croissance, la lutte contre le parcours peut améliorer la perméabilité des sols et réduire l'érosion..) ou amplifier ces impacts (à égale pluviométrie, une pente forte, une texture sableuse, un sol superficiel etc.

Peuvent réduire l'efficacité de la pluviométrie et par conséquent se traduit par un bilan hydrique déficitaire.

D'une manière expérimentale, l'étude bioclimatique et dendrochronologique d'une part et l'étude écophysiological d'autre part ont apporté des résultats très significatifs pour expliquer l'impact des modifications climatiques sur le bilan hydrique et par conséquent sur le déclenchement et la progression du dépérissement du cèdre dans la zone étudiée.

En effet, les précipitations pluvieuses, entre la moyenne de 1930-1980 et celle de 1981-2006, ont accusé une baisse de 214 mm/an ce qui représente 24,2 % de la moyenne de la pluviométrie annuelle durant les trois dernières décennies. Ce taux monte à 32% par rapport à la moyenne si on exclue l'année 1996-97; année exceptionnellement humide.

L'évolution de la hauteur des précipitations neigeuses au niveau de la station d'Ifrane montre une tendance à la baisse relativement plus marquée que celle observée pour les précipitations pluvieuses depuis 1981. En somme, la tendance des précipitations pluvieuses et neigeuses vers la baisse en valeur absolue et vers une concentration dans le temps, l'augmentation de la température et son impact sur le bilan hydrique et la réduction de la durée de la saison de croissance ont limité l'activité de croissance chez le cèdre.

La persistance et l'amplification du stress par les facteurs écologiques limitants conduisent au déclenchement du phénomène du dépérissement. Dans certaines parcelles, la compensation, apportée par certains facteurs (type de substrat, profondeur du sol, topographie, texture, pente...) tamponnant les effets néfastes du bilan hydrique déficitaire et de la rigueur du climat, se traduit par une réduction des taux de dépérissements.

La série dendrochronologique maîtresse montre qu'à partir de la deuxième moitié de la décennie des années 1970, on assiste à une nette tendance à la baisse des épaisseurs des cernes formés. En effet, les cernes plus âgés ont des épaisseurs plus élevées (plus de 2 mm) que les cernes formés plus récemment (1,4 mm de 1974 à 2006) ce qui correspond à une perte de vigueur d'environ 30%.

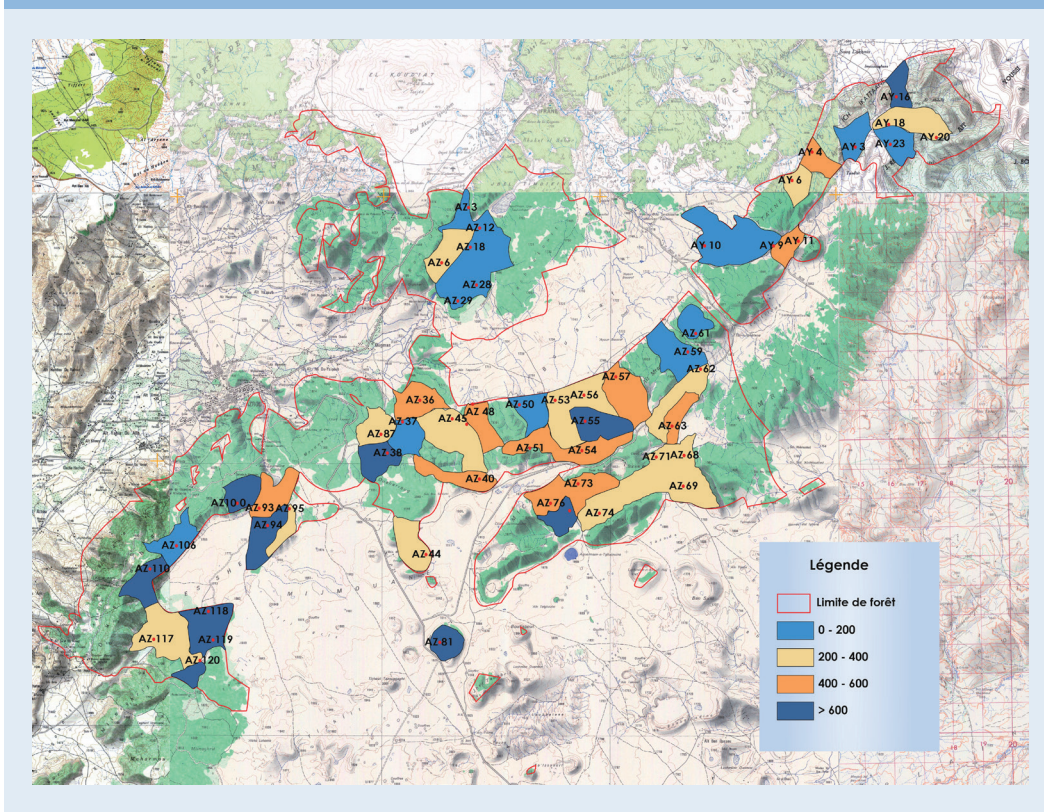
Dans le même ordre d'idées, le « Potentiel Hydrique de Base » (PHB) a enregistré des valeurs assez négatives comprises entre (-14,75) et (-27,75 bars) démontrant que tous les arbres ont présenté un déficit hydrique à l'état d'équilibre avec le sol, et que la teneur en eau des sols a été relativement déficitaire. La variabilité entre les placettes confirme l'effet des conditions stationnelles (substrat, texture, situation topographiques, pente, etc.) qui compensent positivement ou négativement les conditions climatiques générales.

Pour le « Potentiel Hydrique de Midi » (PHM), exprimant principalement la réaction des arbres à la demande évapotranspiratoire de l'air, les moyennes par placette montrent des valeurs plus négatives notamment au niveau des arbres dépérissant. En moyenne, le PHM a été de (-20) bars environ par placette, ce qui indique un potentiel global de transpiration important chez le cèdre au moyen Atlas. «L'Amplitude Journalière du Potentiel Hydrique» (AJPH), a varié entre 8 et 12 bars. Elle a été plus importante au niveau des arbres dépérissants.

Dans les conditions de l'étude, les arbres de cèdre de l'Atlas étaient plus stressés en mars qu'en juillet. En mars, le potentiel hydrique de base a enregistré (-27,75) bars au niveau des arbres dépérissants dans la forêt de Ait Youssi et (-19,58) bars en juillet ; alors que la limite supérieure de l'optimum du fonctionnement hydrique du cèdre se situe au niveau de - 20 bars. Les différentes analyses typologiques ont permis de mettre en relief des gradients tendanciels, dont le gradient de taux de cèdres sains (vifs) qui est de même sens que celui des conditions écologiques et les gradients de mortalités et de dépérissement qui sont de même tendance que le gradient des caractéristiques sylvicoles. Cette superposition de gradients permet de conclure que le dépérissement et la mortalité s'aggravent à mesure que s'accroît le matériel sur pied et que parallèlement les conditions du milieu physique deviennent contraignantes. Une telle relation de cause à effet est bien connue dans l'abondante bibliographie traitant ce sujet, notamment les notions de compétition, d'équilibre et d'autorégulation des peuplements naturels.

Ainsi, le facteur critique prédisposant les peuplements aux mortalités s'exprime à *travers le couple (densité des peuplements, régime hydrique du sol)*. Ce couple reste potentiellement déterminant dans l'apparition graduelle des dépérissements et plus tardivement des mortalités conséquentes de la «sécheresse de type édaphique», en particulier, en l'absence d'outils et de stratégie de gestion de la densité. Ainsi une carte de densité des peuplements est établie pour les besoins des guides de sylviculture (Figure 20).

Figure 20. Carte de densités totales (nombre de tiges /hectare)



5. Essai de construction d'outils d'aide à la décision pour la gestion de la Cédraie d'Azrou

5.1 Elaboration d'un indice de sensibilité du cèdre au dépérissement

Principe

La carte de sensibilité au dépérissement constitue un support indispensable pour l'aménagement et la gestion rationnelle des cédraies du Moyen Atlas. Elle nécessite l'élaboration d'un *indice synthétique* intégrant les facteurs stationnels discriminants du régime hydrique et du stock d'eau du sol en particulier.

En effet, les analyses précédentes ont permis de montrer que le dépérissement du cèdre dans cette zone est lié au régime hydrique du sol. Ce dernier dépend essentiellement des six principales caractéristiques suivantes : la réserve utile (RU) du sol, le substrat sur lequel est formé le sol (Argile, basalte, blocs de dolomie discontinus, dolomie massive), la teneur du sable total au niveau (30 - 60 cm), la teneur en CaCO₃ au niveau (30- 60 cm) de profondeur, la pente, et l'exposition.

Ces six facteurs stationnels sont considérés pour générer l'indice de sensibilité du cèdre au dépérissement. A chacun de ces paramètres est associé 4 classes exprimant chacune un poids dans le modèle proposée à cet effet.

Modèle de calcul de l'indice de sensibilité

La méthode proposée est basée sur des coefficients de pondération accordés aux six facteurs choisis pour étudier, classer et représenter la sensibilité au dépérissement. A chaque facteur est attribué une note, allant de 1 à 10. Un facteur de pondération est ensuite appliqué aux différents facteurs afin de relativiser leur importance respective en termes de vulnérabilité. La note 10 correspond au degré de sensibilité le plus élevé.

L'indice de sensibilité (*IS*) proposée est la somme pondérée des six paramètres selon la formule suivante :

$$IS = 5*RU + 4*SUB + 3*Sa + 2*CaCO_3 + 5*Pe + 3*Ex$$

Avec: (IS): Indice de sensibilité; (RU): Réserve utile; (SUB): Substrat; (Sa): Teneur en sable au niveau de l'horizon 30 – 60 cm;
(CaCO₃): Teneur en calcaire total au niveau de l'horizon 30 – 60 cm;
(Pe) pente en %; (Ex): Exposition dominante

La méthode et les calculs pour la construction de l'indice sont détaillés dans le rapport thématique (M. Chouraichi, 2008; A. Mhamdi et M. Rouchdi, 2008).

Pour pouvoir appliquer ce modèle, il est nécessaire de procéder, dans le cadre d'un SIG en mode Raster. De même, chaque paramètre est généré sous forme d'une carte numérique en format Raster de résolution 5 m. La valeur des paramètres (RU, SUB, Sa et CaCO₃) au sein de chaque placette a été extrapolée sur toute la parcelle correspondante en tenant compte du fait que la parcelle représente une unité de gestion homogène. Le modèle est appliqué ainsi pour des pentes et des expositions variant d'un pixel à un autre. Les classes et notes retenues pour les facteurs sont présentées dans l'encadré 13.

Encadré 13. Classes et notes retenues pour les facteurs pour la construction de l'indice de sensibilité au dépérissement

1. Réserve en eau utile du sol (mm)				
Classes	>150	100 - 150	50-100	<50
Note	1	2	5	8
2. Substrat				
Classes	Sols peu évolués d'érosion ou d'apport colluvial	Sols peu évolués d'apport colluvial sur dolomie ou humifère sur sables dolomitiques	Sable	Sols sur dolomie massive
Note	1	3	8	9
3. Teneur en sable (%) au niveau de l'horizon (30 – 60cm)				
Classes	0-20	20-40	40-60	>60
Note	1	3	5	8
4. Teneur en calcaire total (%) au niveau de l'horizon (30 – 60cm)				
Classes	0-10	10,0-25	25,0-50	>50
Note	1	3	4	7
5. Pente en (%).				
Classes	0-5	5,0-10	10,0-25	>25
Note	1	5	7	10
6. Exposition dominante				
Classes	aucune	N, W, NW	NE, SW	S, E, SE
Note	1	1	4	7

Elaboration de la carte de sensibilité du cèdre au dépérissement

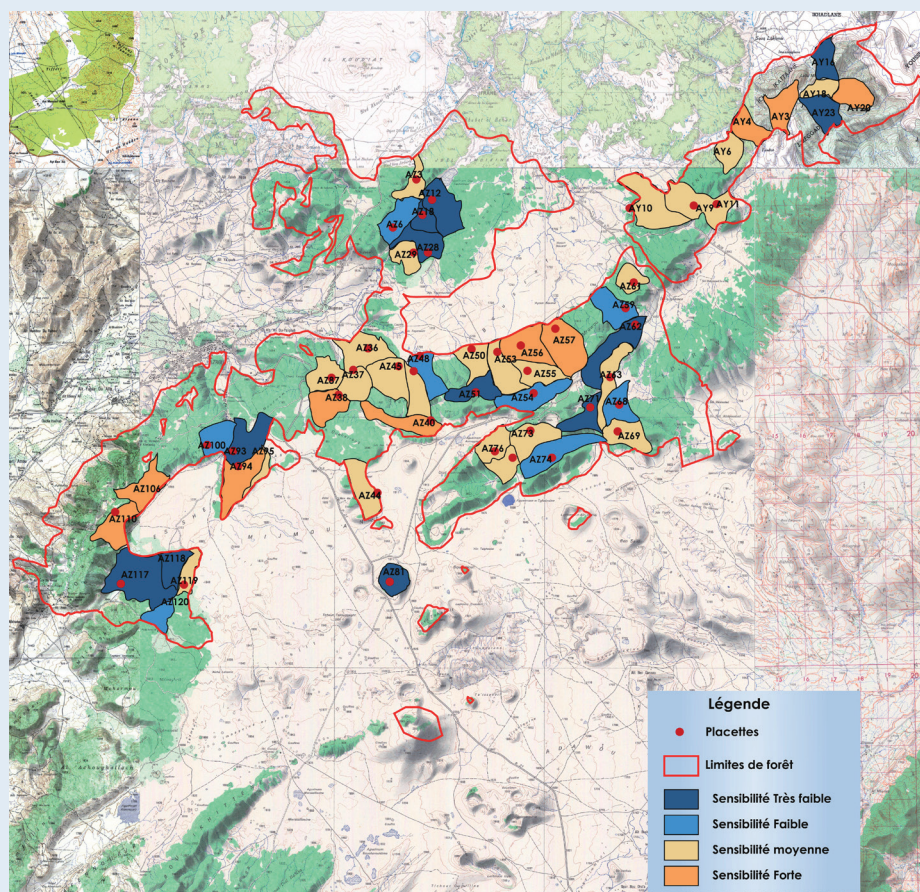
Le résultat issu par application du modèle aux six couches cartographiques est reclassé selon le *tableau 20* en 4 classes représentant la légende de la carte de sensibilité du cèdre au dépérissement (*figure 21*)

Classes de sensibilité	Indice de sensibilité	Niveau de sensibilité (Légende de la carte fig.19)
Classe I	20 - 50	Très faible
Classe II	50 - 80	Faible
Classe III	80 - 120	Moyenne
Classe IV	120 - 160	Forte

La validation du modèle est une étape très importante pour décider de son utilisation. Sur la base d'une visite dans la zone d'étude et d'une discussion avec les gestionnaires du terrain, une description des parcelles échantillonnées a été établie comme donnée de référence. Cette donnée a été représentée en 4 classes de dépérissement (Très faible, faible, moyenne, forte) et confrontée ainsi au résultat issu du modèle. *Le tableau 21* présente la matrice de confusion relative au modèle construit qui met en relief un degré de précision totale élevé de l'ordre de 74%.

Références	1	2	3	4	Total
Modèle					
1	10	1	1	0	12
2	0	8	0	0	8
3	2	4	15	3	24
4	0	1	2	7	10
Total	12	14	18	10	54

Figure 21. Carte de sensibilité du cèdre au dépérissement



5.2 Essai de prédiction des mortalités et des dépérissements du cèdre

Principe

Quoique l'étude des mortalités forestières relève des inventaires périodiques, des dispositifs expérimentaux rigoureux et des dispositifs de placettes permanentes conçues et installées selon des processus d'échantillonnage appropriés, la disponibilité des données concernant ce sujet incite à des essais d'approximation de modèles à titre spéculatif. En effet, dans le contexte des forêts marocaines en général et pour la cédraie étudiée en particulier, l'idée de mise en place de ce type d'infrastructures scientifiques est encore au stade de la réflexion.

A ce sujet, il est utile de rappeler que la possibilité d'estimer aussi bien la production des arbres et des peuplements forestiers, que de prédire les dépérissements et les mortalités devient une préoccupation pertinente des gestionnaires forestiers dans la mesure où ces outils demeurent indispensables à tout processus rationnel de planification forestière qu'elle soit d'ordre national ou régional.

Toutefois, un modèle demeure un processus de spéculation intellectuelle tant que sa validité n'a pas été contrôlée. Il devient alors important de préciser que ces modèles doivent faire l'objet d'un contrôle de validité pour déterminer dans quelle mesure ceux-ci représentent fidèlement la réalité.

Cependant, les essais développés dans ce paragraphe permettent d'inaugurer la réflexion pour de nouveaux travaux complémentaires relatifs à cette problématique. A ce sujet, l'atout de l'inventaire dendrométrique et phytosanitaire réalisé dans le contexte de cette étude réside dans les faits suivants :

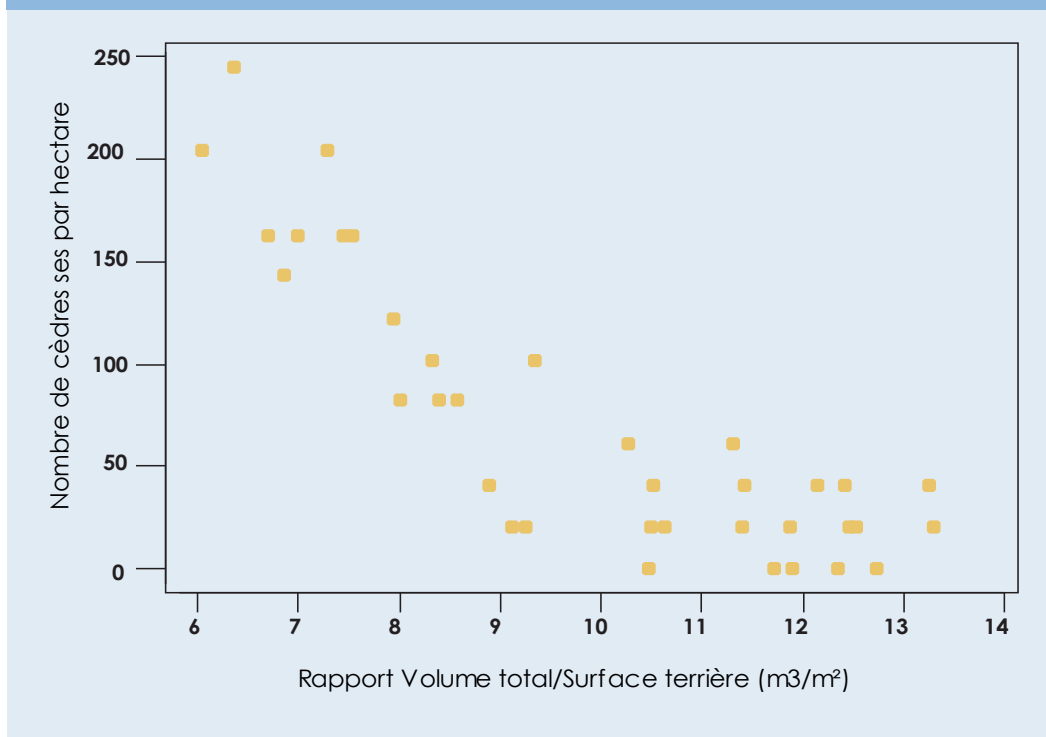
- ⦿ les arbres morts sont encore sur pied à la date de l'inventaire, leurs dimensions ont été mesurées.
- ⦿ le recensement a été réalisé par type de vitalité (mort, dépéris et vif).
- ⦿ le traitement des données a permis de dresser deux constats, l'un considérant la densité, la surface terrière et le volume total considérés comme un état initial ; le second détermine le reste du peuplement vif après que les mortalités se soient exprimées.

Cet ensemble de jeux de données est supposé correspondre à l'image de deux inventaires successifs; et c'est cette situation qui autorise la réflexion à la modélisation.

Approximation d'un modèle de prédiction des mortalités du cèdre

Le modèle en question fait allusion à la prévision des mortalités dans des peuplements de cèdre où la surface terrière et le volume seraient connus. Ces derniers, sous des expressions de la densité des peuplements, seraient les variables explicatives d'une équation de prédiction des mortalités en termes de densité également. Ce type d'équation exprime la relation de dépendance de paramètres caractérisant le phénomène de compétition intraspécifique.

Figure 22. Diagramme de corrélation entre le nombre de cèdre secs selon le rapport Volume/surface terrière



Le processus d'ajustement de ce type d'équation a appréhendé le test de nombreuses relations de dépendance parmi les caractéristiques dendrométriques (brutes et transformées) de la base de données constituée. La relation retenue est celle entre la densité du nombre de cèdres morts et le volume unitaire total par unité de surface terrière correspondante.

La figure 22 présente le diagramme de corrélation entre le nombre de cèdre secs selon le rapport Volume /surface terrière qui donne l'allure de la forme de la et le sens de la relation.

L'équation de régression (polynôme du second degré) obtenue est la suivante :

$$DSEC = 910,719 - 151,300 (V/G.Tot) + 6,40620 *(V/G.tot^2)$$

$$(R^2 = 86,3 \% ; \text{Ecart -type résiduel} = 26,08)$$

DSEC: Densité de mortalité du cèdre en nombre de tiges à l'hectare,

V/G.tot: Rapport du volume total à la surface terrière totale en m³/m² à l'hectare.

Le tableau d'analyse de variance relatif au polynôme de type $Y = a + b.x + c.x^2$ est présenté dans le tableau 22.

Tableau 22. Analyse de la variance de l'équation de régression Mortalité = f (V/G)					
Source	DL	SC	CM	F	P
Régression	2	141343	70671,3	103,894	0,000
Erreur	33	22447	680,2	-	-
Total	35	163790	-	-	-

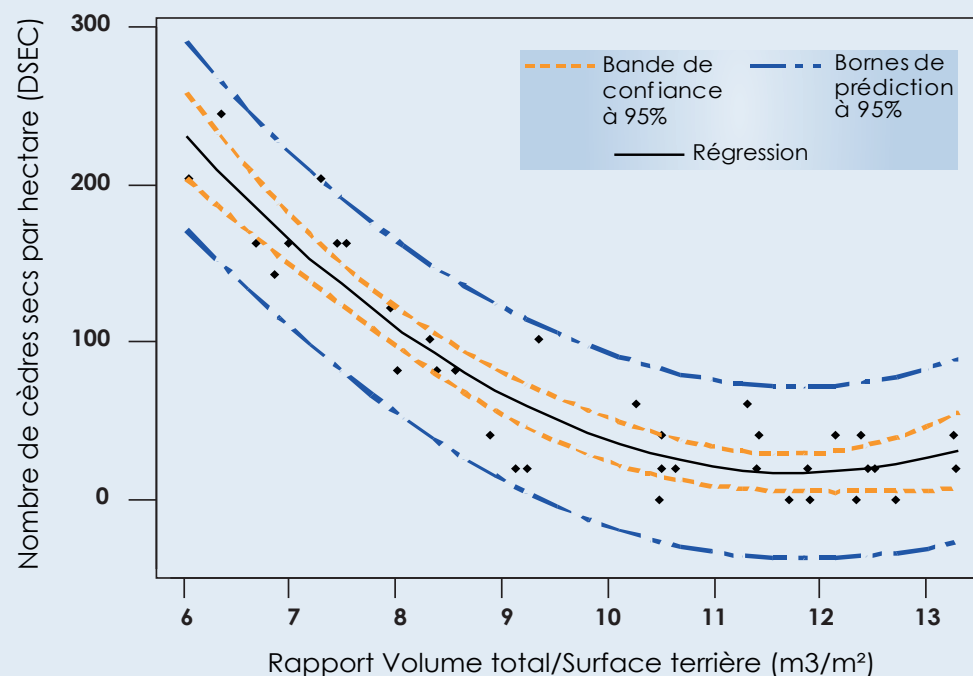
DL: degré de liberté;
SC: somme des carrés,
CM: carrés moyens,
F: Fisher,
P: probabilité.

Le modèle quadratique (valeur de $p=0,000$ ou valeur réelle de $p < 0,0005$) semble bien s'ajuster aux données ; la relation est statistiquement significative. L'utilisation de valeurs de p est un moyen beaucoup plus direct d'effectuer un test que celle des valeurs de F .

La courbe d'ajustement du polynôme ajusté est illustrée par la figure 23. Cette figure présente les bornes de confiance (tires) autour de la droite de régression ajustée, au niveau de confiance 95%. Les bandes de prédiction sont les limites de prévision autour de la droite de régression, ajustées au niveau de confiance 95% (tiret – point).

Le test de la significativité de la relation rejette l'hypothèse d'indépendance et la valeur élevée du coefficient de corrélation exprime une relation intense de sens négatif (allure décroissante de la figure 25). L'intensité exprime la capacité du rapport Volume/surface terrière à prédire les valeurs de densité de mortalité. Il est en effet bien connu que la relation étudiée recouvre une relation causale.

Figure 23. Courbe de régression et intervalle de confiance



Approximation d'un modèle de prédiction des dépérissements du cèdre

La même procédure a été suivie pour l'approximation de la fonction de dépendance entre la densité de cèdres dépéris (N/ha) et la densité totale (N/ha) du peuplement initial. L'analyse montre que le diagramme des corrélations exprime une relation croissante du dépérissement en fonction de l'augmentation du nombre de tiges (figure 24).

L'équation de régression qui s'ajuste le mieux aux données recueillies pour cette fonction est un polynôme cubique (3^{ème} degré) de la forme :

$$\text{DDEP} = -29,6978 + 0,761628 (\text{N/ha.tot}) - 0,0016879 (\text{N/ha.tot})^2 + 0,0000012 (\text{N/ha.tot})^3$$

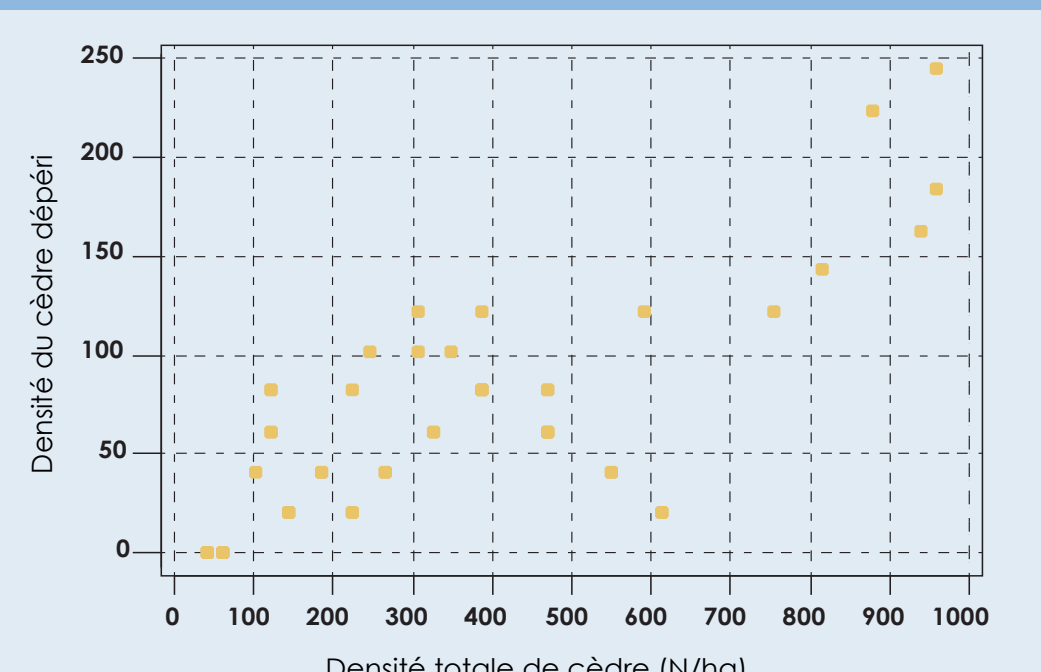
(R² = 76,9 % Ecart -type résiduel=31,4374)

DDEP : densité de cèdres dépéris (N/ha)

N/ha.tot : densité totale de cèdre (N/ha)

Cette équation affiche des caractéristiques relativement plus faibles que le polynôme précédent. Le coefficient de corrélation liant ces deux caractéristiques est **r = 0,813**, doté d'une probabilité **p = 0,000**. Ces deux valeurs renseignent sur l'intensité et le sens positif ou croissant de la relation entre ces deux dimensions.

Figure 24. Diagramme de corrélation du nombre de tiges dépéris selon la densité totale

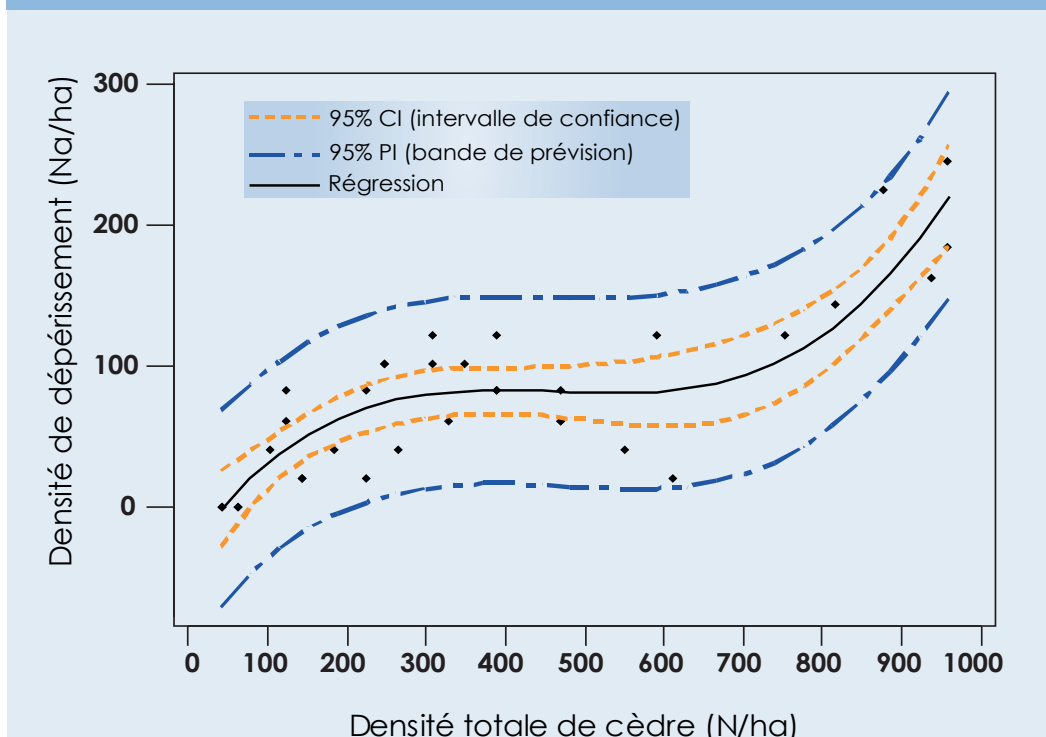


Ces valeurs, ainsi que celles du *tableau 23*, demeurent acceptables dans la mesure où la problématique des dépérissements reste encore d'actualité scientifique en termes de prévision.

Tableau 23. Analyse de variance de l'équation Dépérissement = f (densités totales)					
Source	DL	SC	CM	F	P
Régression	3	101874	33958,1	34,3597	0,000
Erreur	31	30638	988,3	-	-
Total	34	132512	-	-	-

Le modèle établi permet d'expliquer 77% de la variation du nuage de points. Il en va de même pour les prévisions à venir à condition de respecter la fourchette des valeurs extrêmes ayant permis de construire ce modèle. La courbe d'ajustement exprimée par le modèle ci-dessus est illustrée par la *figure 25*.

Figure 25. Courbe de régression et intervalle de confiance



De même que pour le polynôme précédent, les valeurs s'insèrent beaucoup plus dans la bande de prévision que celle de confiance de la régression au seuil de 95%.

6. Programme d'action: Principes de base, conception et contenu

6.1 Cadre phytogéographique de la gestion des cédraies étudiées

Au Moyen Atlas, les peuplements de cèdre organisent divers groupements dans les étages bioclimatiques : humide à variante froide, subhumide à variante froide et subhumide à variante très froide (tableau 24). Du point de vue phytosociologique, ces peuplements s'encartent soit dans la Classe des *Quercetea pubescentis*, Ordre des *Quercocedretalia atlanticae*, soit dans la Classe des *Quercetea ilicis*, Ordre des *Quercetalia ilicis* ou Ordre *Ephedro-juniperetalia* (Benabid, 1982).

Tableau 24. Données bioclimatiques des stations de référence

Station	P (mm)	M (°C)	m (°C)	Q2	Etage bioclimatique
Ifrane	1122,0	29,5	-1,3	127,7	Humide à variante froide
Dayet Aoua	536,4	30,0	-1,3	60,0	Subhumide à variante froide
Dayet Hachlaf	594,2	32,1	-4,9	56,5	Subhumide à variante très froide

P mm.: Précipitations moyennes annuelles.

M°C : moyenne des maxima du mois le plus chaud (juillet).

m : Moyenne des minima du mois le plus froid (janvier).

Q2 : coefficient pluviothermique d'Emberger.

Ils composent, ainsi, trois types de cédraies :

- ⊙ La cédraie de l'étage supraméditerranéen infiltrée par des chênes sclérophylles ou caducifoliés aux altitudes (1600–1800 m).
- ⊙ La cédraie de l'étage montagnard méditerranéen généralement pure et dense (1900-2000 m).
- ⊙ La cédraie de l'étage oroméditerranéen inférieur, clairsemée et infiltrée d'espèces de pelouses et de genévrier thurifère, aux altitudes supérieures à 2000 m.

Dans les forêts objet de cette étude, les peuplements forestiers sont composés de cèdre pur ou de cèdre en mélange avec le chêne vert. Ces peuplements sont infiltrés par d'autres espèces forestières distribuées par tâches ou par pieds isolés, tels que: le chêne-zeen (*Quercus canariensis*), le genévrier thurifère (*Juniperus thurifera*), le frêne dimorphe (*Fraxinus xanthoxyloides*), le frêne oxyphylle (*Fraxinus angustifolia*), l'érable de Montpellier (*Acer monspessulanum*), l'if (*Taxus baccata*), le houx (*Ilex aquifolium*), les aubépines (*Crataegus laciniata* et *Crataegus monogyna*), Cityse de Battandier (*Argyrocitrusus battantieri*), le daphné (*Daphne laureola*). A ce cortège arboré et arbustif, s'ajoute une riche flore herbacée, caractéristique de la cédraie et de la chênaie verte des étages humide et subhumide.

6.2 Structure et consistance de l'aménagement en vigueur

Pour la forêt d'Azrou, l'aménagement en vigueur a été élaboré en 2006 pour une période de 24 ans. Cet aménagement dit «aménagement concerté» est une variante des nouveaux aménagements qui accorde une grande importance à la composante sociale considérée comme une véritable contrainte à toute fonction de la forêt. La particularité de ce nouvel aménagement réside aussi dans l'inclusion de la forêt au sein du parc national d'Ifrane dont les règles de gestions sont définies selon le zonage du parc. L'aménagement a pour objectif principal d'assurer la conservation de la biodiversité et des écosystèmes forestiers (cèdre, chêne vert, chêne zeen), le développement de l'écotourisme dans la région et la promotion des filières dans un cadre de gestion concertée de l'espace. A cet effet la forêt est divisée en unités de gestion ou séries, tenant compte de sa situation dans le Parc National d'Ifrane (tableau 25).

Tableau 25. Organisation de la forêt d'Azrou - actions sylvicoles				
Séries	Parcelles	Nbre	Surface	%
1. Zone naturelle protégée				
Série de protection intégrale	1-2-3-4-5-6-7-70-71-72-73-76-77-78-79-80-81. (Aucune intervention)	17	2 542,86	14,7
2. Zone de gestion des ressources naturelles : futaie régulière				
Cédraie sur basalte	29-36-39-40-41-42-43-44-119-120-121-122-96. (1 groupe d'amélioration : éclaircie du cèdre et dépressage du chêne vert, assainissement)	13	1 048,73	6,0
Cédraie sur calcaire	Groupe de régénération (1) 15-31-38-45-48-54-55-57-87-64-91-8-13-94-61-62-93. 12-28-32-89-86-115-116-117-118-58-59-74-68-60. (Action non précisées)	31	4 926	28,5
	Groupe d'Amélioration (1) 9-10-11-14-35-37-46-47-84-49-50-51-53-56-90-92-52-63-83-18. (éclaircie du cèdre et dépressage du chêne vert, assainissement)	20	2 383	14
3. Zone d'amélioration pastorale (non considérée dans cette étude)				
Chênaie verte	16-17-19-20-21-22-23-24-25-26-27-30-33-34-65-66-67-69-75-82-85-88-95-97-98-99-100-101-102-103-104-105-106-107-108-100-10-111-112-113-114.	41	6 344,00	36,8
Total		122	17 244,77	100

L'aménagement de la *forêt d'Aït Youssi*, périmé en 2004, a fait l'objet réadaptation, pour une gestion conforme avec le parc national d'Ifrane. Ce massif, entièrement inclus dans la zone de gestion des ressources naturelles, comprend trois unités de gestion (*tableau 26*).

Tableau 26. Organisation de la forêt d'Aït Youssi - actions sylvicoles			
Série	Parcelles	Surface (ha)	%
Futaie régulière de cèdre	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 18, 20, 23, 29 (coupes d'assainissements)	2448	42
Futaie jardinée de cèdre	16, 17, 19, 21, 22, 24 25, 26, 27, 28, 30, 31, 37, 39, 42, 43, 44, 45 (coupes de bois mort ; éclaircie du chêne vert)	2539	43
Taillis de chêne vert	32, 33, 34, 35, 36, 38, 40*, 41*	889	15

L'aménagement concerté de la forêt d'Azrou, est marqué de prudence quant à l'application rigoureuse des techniques préconisées par la méthode de régénération par coupes progressives auxquelles est soumis ce massif. Il ne prévoit pas d'intervention dans la zone naturelle et oriente plus les interventions sylvicoles, dans les autres zones, vers les coupes d'assainissement, d'éclaircie du cèdre et de dépressage du chêne vert. L'aménagement de la forêt d'Aït *Youssi* a pris fin en 2007 alors que les interventions dans ce massif sont plus axées sur des coupes d'assainissement du cèdre, avec une ampleur importante, et vers la régénération artificielle par plantation dont le taux de réussite reste faible.

En effet, les gestionnaires se sont trouvés, dès 2001, face à des dépérissements de cédraies anormalement importants. Ce phénomène très rapide a provoqué des mortalités variables, en fonction des zones des massifs étudiés et en intensité de dégâts, exprimé par l'importance en volume récolté par les coupes d'assainissement. Les dégâts ont atteint, en 2001, une surface d'environ 3 400 ha, alors que sur certains versants, les arbres sont tous morts. Le volume des exploitations de bois mort dépassent de loin les prévisions de l'aménagement et du plan de gestions. Mais, quoiqu'il en soit, le dépérissement demeure un phénomène sélectif, spécifique au cèdre de l'Atlas dans cette région. Il est certain que les connaissances nouvelles apportées par la présente étude, viendront enrichir la connaissance et le savoir-faire des praticiens.

Elles permettront, de ce fait, d'adapter l'aménagement de ces forêts pour mieux intégrer la contrainte «dépérissement» dans la gestion de ces écosystèmes.

6.3 Causes du dépérissement : nécessité d'une opération d'urgence

Le dépérissement des cédraies du Moyen Atlas est un phénomène récent, tout au moins à l'état de nos connaissances. Constaté déjà durant la grande période de sécheresse (1940 -1945) qu'a connue le Maroc, ce phénomène est réapparu au cours de la décennie 1990-2000. Mais, depuis le début du siècle, les peuplements de cèdre du Moyen Atlas subissent un phénomène important de dépérissement dont l'ampleur et la gravité ont suscité la réaction des autorités administratives, des chercheurs et des pouvoirs publics.

En effet, les analyses thématiques du dépérissement du cèdre dans la zone d'étude (*chapitre 3*) montrent que ce phénomène est le produit d'un cumul de stress de plusieurs facteurs sur plusieurs années. Ainsi vu les spécificités statique ou dynamique de chacun des facteurs faisant partie des causes du dépérissement, le climat, exprimé dans cette étude à travers la « Réserve utile en eau du sol », semble être le facteur le plus prépondérant dans l'explication du dépérissement. L'impact de ce facteur, en conjugaison avec les autres facteurs étudiés, s'exprime différemment selon l'importance de compensation et d'interaction entre eux.

Les différentes analyses typologiques (*Chapitre 4*) ont démontré que le dépérissement et la mortalité s'aggravent à mesure que s'accroît le matériel sur pied et que parallèlement les conditions du milieu physique deviennent contraignantes. Une telle relation de cause à effet est bien connue dans l'abondante bibliographie traitant ce sujet, notamment les notions de compétition, d'équilibre et d'autorégulation des peuplements naturels.

Ces analyses ont permis, aussi, de mettre en relief des gradients tendanciels. En particulier, le gradient de taux de cèdres sains (vifs) est de même sens que celui des conditions écologiques et les gradients de mortalités et de dépérissement sont de même tendance que le gradient des caractéristiques sylvicoles.

Il ne se dégage que le facteur critique prédisposant les peuplements aux mortalités *s'exprime à travers le couple «densité des peuplements, régime hydrique du sol» (figure 15)*. Ce couple reste potentiellement déterminant dans l'apparition graduelle des dépérissements et plus tardivement des mortalités conséquentes de la « sécheresse de type édaphique », en particulier, en l'absence d'outils et de stratégie de gestion de la densité.

L'encadré 14 présente un résumé des facteurs jugés discriminants par rapport au dépérissement du cèdre

Encadré 14. Facteurs discriminants /Dépérissement: contraintes d'aménagement

- Modification climatiques à tendance xérique : *sécheresse récurrente depuis plus 3 décennies* :
 - *Tendance à l'augmentation des T°C : M et m (1981-2006).*
 - *Baisse de P mm de 24% entre les périodes (1930–1980) et (1981-2006).*
 - *Fréquence des années sèches de 59 à 77%.*
 - *Tendance à la baisse de la neige, plus marquée depuis 1981.*
- *Action déterminante du substrat et de la topographie, sur le bilan hydrique du sol.*
- *Fréquence et gradation du xylophage *Phaenops marmottani* sur les classes de dépérissement et sur les arbres morts :*
 - *Un ravageur primaire redoutable.*
 - *Attaque les arbres en pleine vitalité.*
 - *Participation active au phénomène.*
- *Action prépondérante de la sylviculture : densité, composition des peuplements, couvert.*
- *Tempérament délicat du cèdre : forte évapotranspiration, besoins en eau excessifs ; (espèce opportuniste sur le plan hydrique).*
- *Action anthropique très forte : écimages, ébranchage et mutilations des arbres, parcours intense et violations des mises en défens.*



Les synthèses (*chapitre 4*) ont permis de mieux appréhender les liens de causalité pouvant expliquer le phénomène de dépérissement et d'élaborer, en conséquence, un certain nombre d'outils nécessaires pour la mise en œuvre de stratégies d'intervention à court, moyen et long terme, en particulier :

- La typologie de l'état phytosanitaire du cèdre (*figure 17*).
- La carte des densités (*figure 18*).
- La carte de sensibilité du cèdre au dépérissement (*figure 19*).

Les propositions de directives d'aménagement et de sylviculture pour remédier au dysfonctionnement de la cédraie intègrent les résultats et les outils élaborés dans le cadre de ces études. Ces propositions font l'objet d'un guide de sylviculture dans les chapitre qui suivent, pour une durée au moins équivalente à celle de l'application de l'aménagement en vigueur. Il n'en demeure pas moins vrai qu'un programme d'urgence, qui mobilisera les moyens humains et matériels, s'impose.

L'encadré 15 présente les éléments de ce programme.

Encadré 15. Programme d'intervention d'urgence

- Réaliser des coupes d'assainissement dans les deux forêts : *Prélever systématiquement tous les arbres morts et les dépérissants de la classe 4 (100 % de perte foliaire) et de la classe 3 quand la perte foliaire dépasse 60%.*
- Réaliser les coupes à un rythme cohérent, *pour éviter la détérioration de la qualité technologique du bois et la prolifération des xylophages parasites: Une période indicative de 5 ans semble suffisante pour accomplir ces opérations.*
- Procéder à la réadaptation de l'aménagement de la forêt d'Aït Youssi
- *Le calcul de la possibilité indicative des coupes, peut se déduire du tableau ci-après :*

Volumes des arbres morts et dépérissants par canton

Canton (Triage)	Surface	Volume (m ³ /ha)	
		Dépérissant*	Mort
Azrou	4801,47	60,661	120,736
Boutrouba	5594,55	47,885	130,452
Dayat Hachlaf sud	3133,09	109,716	139,589
Ras El Ma nord	3462,60	79,652	96,953
Ras El Ma sud	3304,15	2,965	73,312

Volumes relatifs à toutes les classes de dépérissement

Parcelles prioritaires : (voir cartes de densité des peuplements et de sensibilité du cèdre au dépérissement)



6.4 Guide de sylviculture: concept et contenu

Le guide de sylviculture ou « modèle » est un outil, à l'usage de l'aménagiste et du gestionnaire, qui définit le cheminement sylvicole le plus économe et le plus efficace pour optimiser les objectifs fixés. Dans le cas de la présente étude, il s'agit de *proposer un modèle de gestion et de sylviculture sous la contrainte de dépérissement* qui ambitionne de redynamiser les cédraies et aider à surmonter leurs difficultés phytosanitaires.

Les guides de sylviculture sont élaborés au niveau de chaque forêt. Pour une forêt donnée et un type de traitement adopté (taillis simple, futaie régulière, futaie jardinée...), il est possible de conduire les peuplements, de leur état juvénile jusqu'à leurs âges d'exploitabilité, de diverses manières selon des règles de culture adoptées. Si nuancés soient-ils, les guides ne dispenseront jamais, au niveau des interventions de faire preuve de pragmatisme et de doigté pour adapter en chaque endroit l'application du guide.

Pour les forêts cibles d'Azrou et d'Aït Youssi, L'élaboration des guides de sylviculture proposés est fondée sur les résultats des analyses thématiques (*chapitre 3*), sur l'analyse globale des relations « santé des peuplements – station - sylviculture - symptômes et dommages phytosanitaires », les propositions des aménagements en vigueur et les contraintes imposées par le Parc national d'Ifrane où sont implantées ces deux forêts.

Ainsi, les éléments pris en considération concernent, en particulier, les éléments suivants :

- ⊙ Les niveaux de potentialités des milieux définis au chapitre 8 qui distinguent trois niveaux
 - ◆ **Bonnes potentialités** : milieux sur substrat basaltique où le taux de cèdre sain varie de 75 à 100 %.
 - ◆ **Potentialités moyennes** : milieux sur substrat calcaire et calcaire dolomitique en expositions fraîches et en pentes douces où le taux d'arbres sain est compris entre 25 et 75 %).
 - ◆ **Potentialités médiocres** : milieux sur substrat de dolomie sableuse et calcaire compact, en expositions chaudes et sur des pentes fortes (> 30 %) où le taux d'arbres sains est inférieur à 25 %).
- ⊙ L'intensité du dépérissement définis par l'indice, la carte de sensibilité au dépérissement et la carte des densités (*Chapitre 10*).
- ⊙ Le zonage du Parc National d'Ifrane, en principe, les objectifs fixés pour toutes les forêts situées à l'intérieur du Parc National d'Ifrane, varient selon la position de la forêt dans le zonage du parc (zone naturelle protégée, sanctuaire naturel et zone de gestion des ressources naturelles).
- ⊙ Le mode de traitement illustré dans cette étude par la structure du peuplement régulière ou irrégulière.
- ⊙ Les prescriptions des aménagements en vigueur.
- ⊙ Le parcellaire existant des deux forêts.

Cependant quel que soit le niveau de pertinence des guides de sylviculture élaborés, le gestionnaire doit garder à l'esprit les éléments constants suivants pour mener ses interventions, et plus particulièrement :

- ⊙ le maintien autant que possible des peuplements de cèdre pour assurer une permanence de l'ambiance forestière qui limite les stress subis par les peuplements en place.
- ⊙ la reconstitution des peuplements fortement atteints et la réhabilitation des milieux sur les versants où le cèdre est éradiqué par les coupes d'assainissement.

- l'exploitation des arbres morts et des arbres dépérissant, généralement au stade 4, avant sa dépréciation des produits ligneux.

Les propositions et recommandations présentées dans les guides de sylvicultures proposés dans la suite s'organisent autour des trois éléments principaux suivants:

- Caractéristiques de la série : il s'agit de rappeler les types de milieux de l'unité de gestion concernée et de préciser la composition et la consistance du peuplement, la nature et l'intensité du dépérissement.
- Directives d'aménagement : il s'agit de nuancer et de compléter les propositions de l'aménagement en vigueur, pour tenir compte de la contrainte « dépérissement » imposée aux peuplements, dans les domaines du choix des objectifs, du classement des parcelles, de la structures finale du peuplement, des rotations des coupes et du niveau et types de régénération.
- Recommandations de sylviculture : ces recommandations concernent les interventions qui ont une action directe sur le dépérissement, en particulier : les types, nombre et techniques des coupes, les modalités d'exécution des coupes des dépérissants, les modalités d'utilisation des normes de densité et de traitement du chêne vert, les techniques de martelage des coupes, et les techniques de reconstitution de la cédraie.

La figure 26 présente une esquisse schématique de l'élaboration des guides de sylviculture pour deux massifs forestiers d'Azrou et d'Ait Youssi. Les éléments des guides sont présentés sous forme de recommandations pour mieux faciliter leur mise en application par les gestionnaires.

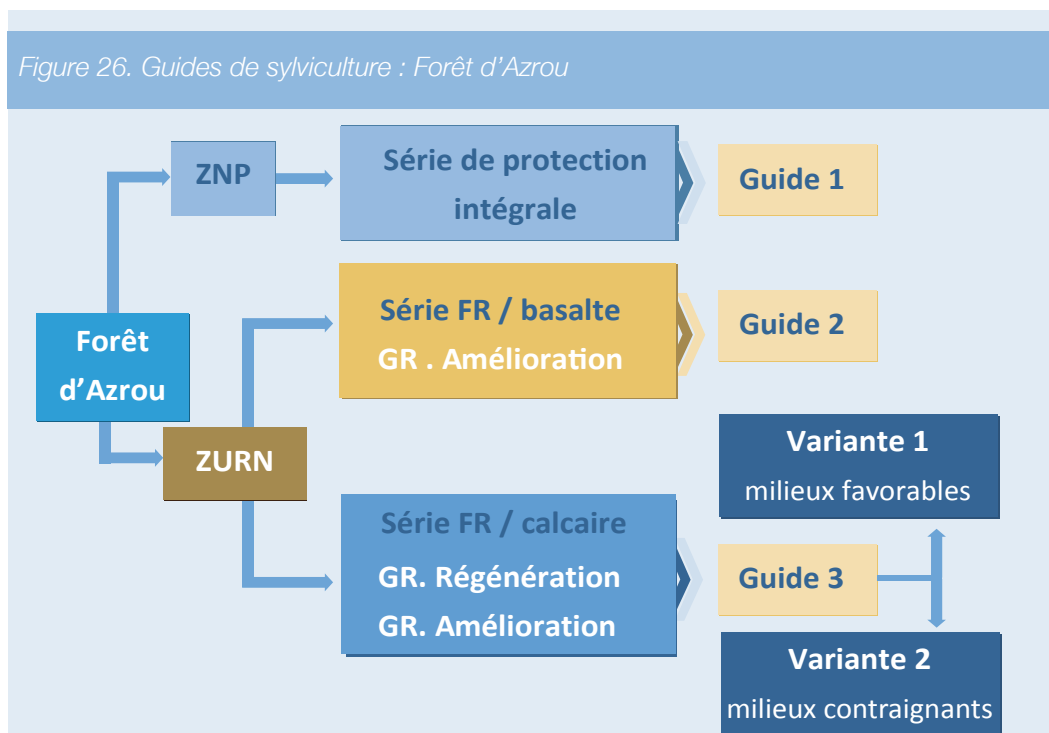
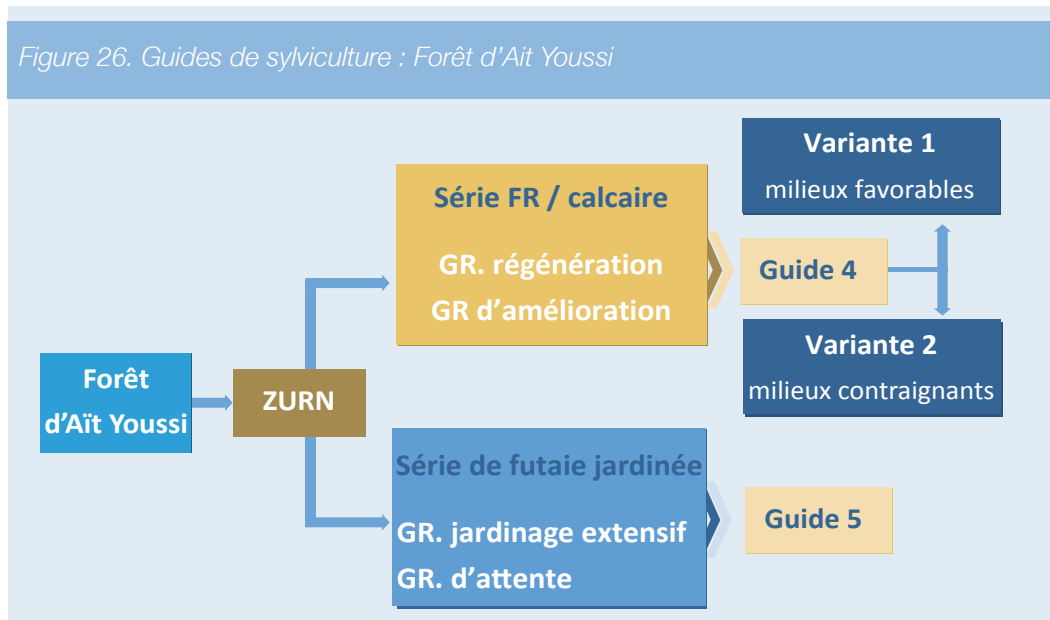


Figure 26. Guides de sylviculture : Forêt d'Aït Youssi



ZNP: Zone naturelle protégée.

ZURN: Zone d'utilisation des ressources naturelles.

GR: groupe.

FR: futaie.

7. Guides de sylviculture de la forêt d'Azrou

7.1 Guide 1 : Série de protection intégrale

Le statut de cette série composée de 17 parcelles d'une superficie totale de 2542, 82 ha, ne prévoit aucune intervention sylvicole, sauf des prélèvements à des fins scientifiques. On peut toutefois, de même entreprendre des actions de réhabilitation ou de reconstitution du milieu en cas d'absolue nécessité. Il est envisageable de mener des actions de nettoyage et d'assainissement des peuplements dépérissants, dans le cadre de la réalisation des interventions à court terme prévues (encadré 10).

Les suggestions suivantes sont proposées :

- ⊙ **Caractéristiques de la série:** Zone naturelle de protection incluse dans le Parc National d'Ifrane.
- ⊙ **Directives d'aménagement proposé:**
 - ◆ Aucune intervention permise, en raison du statut du parc, à l'exception des prélèvements à des fins scientifiques dûment autorisées.
 - ◆ Nettoyements, assainissements des arbres dépérissants possible: arbres morts et arbres au stade 4 de dépérissement (100 % de perte d'aiguilles) et de la classe 3 quand la perte foliaire dépasse 60%.
 - ◆ Une période indicative de 5 ans est suffisante pour parcourir l'ensemble des parcelles de cette série et accomplir ces opérations.
- ⊙ **Recommandations de sylviculture:** martelage des coupes.
 - ◆ Dans les peuplements au stade de perchis et de futaie, pratiquer un martelage en abandon comme d'ordinaire avec une consigne rigoureuse de l'exploitation (marques au corps et au pied avec le marteau de l'Etat).
 - ◆ Dans les peuplements au stade de fourré et de gaulis, une marque à la peinture est économiquement suffisante.

7.2 Guide 2: Série « Futaie régulière sur basalte »

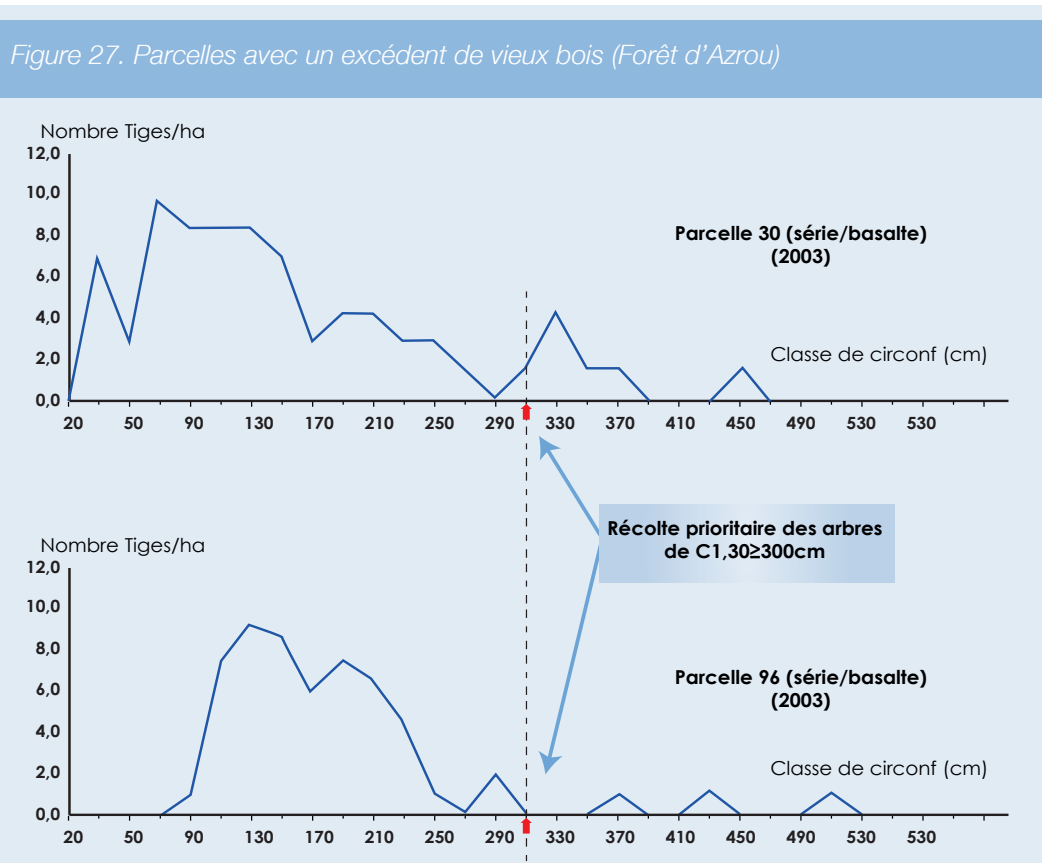
- ⊙ **Caractéristiques de la série**
 - ◆ La série, d'une superficie de 1408 ha, est sur substrat basaltique quaternaire constituant des milieux à fort potentiel.
 - ◆ Les peuplements sont denses et d'une sensibilité faible à moyenne (cartes de densité et de sensibilité du cèdre au dépérissement, chap. 10).
 - ◆ La série, est composée de cèdre pur et de cèdre en mélange avec le chêne vert, en majorité à l'état jeune et adulte, elle présente de ce fait, un seul groupe : le Groupe d'amélioration.
 - ◆ Le dépérissement et la mortalité du cèdre sont sporadiques et répartis par pieds d'arbres.
 - ◆ Dans les triages d'Azrou, de Ras El Ma sud et Ras El Ma nord, les peuplements sains de cèdre en grande partie sur basaltes, ont des surfaces terrières excessives, respectivement égales à 39,89; 30,87 et 32,64 m² à l'ha. alors que la surface terrière optimale ne doit pas dépasser 20 à 25 m² à l'ha.

⊙ Directives d'aménagement

- ◆ Maintien des principaux objectifs de l'aménagement.
- ◆ Maintien du classement des parcelles en un seul groupe: groupe d'amélioration.
- ◆ Veiller à la régularisation des structures du cèdre surtout dans les parcelles 30, 96 et 121, par des récoltes intenses de vieux bois (semenciers de circonférences à 1,30 m \geq 300 cm) (figure 27).

⊙ Recommandations de sylviculture

Compte tenu du surstockage du matériel ligneux sur pied, du stade de développement du peuplement et de la sensibilité encore faible à moyenne des arbres, des coupes d'éclaircies sont d'une nécessité urgente. Les recommandations suivantes sont proposées pour la conduite sylvicole des peuplements de cèdre et de chêne vert.



Concernant le cèdre

- ⊙ **Réaliser des coupes**, en priorité, des arbres morts et des arbres dépérissants de la classe 4 et de la classe 3 quand la perte foliaire dépasse 60%.
- ⊙ **Une période indicative** de 5 ans est suffisante pour parcourir l'ensemble des parcelles de cette série.

⊙ **Pratique des éclaircies:**

- ◆ Adopter une rotation courte ($r = 8 \text{ ans}$) au lieu de 24 ans proposés par l'aménagement en vigueur, pour mieux suivre l'évolution et la dynamique des peuplements, pour éviter d'éventuels dégâts de chablis dans ces peuplements très denses, et une mauvaise réaction des arbres à la brutalité de ces coupes.
- ◆ En attendant la construction de normes de densités dans chaque faciès de la cédraie, l'intensité de la première éclaircie à réaliser dans l'immédiat, pourrait être évaluée en se référant à la norme construite pour la cédraie sur basalte du canton d'Ich ou Harok (*Encadré 16*).
- ◆ Pratiquer des éclaircies par le bas qui réduiront la surface terrière du peuplement à environ 20 à 25 m²/ ha. Cette éclaircie doit viser l'assainissement de la forêt et l'amélioration des peuplements, tout en respectant l'étage dominant dans la mesure où celui-ci est en pleine vigueur.

- ⊙ **Martelage des arbres:** la priorité sera accordée aux arbres dépérissants et aux vieux bois (C >300 cm)

Concernant le chêne vert

- ⊙ **Prévoir 2 rotations** de 12 ans au lieu d'une rotation à 24 ans prévue par l'aménagement en vigueur :
- ◆ **1^{ère} rotation** : réaliser des dépressages avec un prélèvement de 50 à 60 % des brins par cépée avec la coupe en priorité des brins traitants et des brins dominés.
 - ◆ **2^{ème} rotation** : Réaliser une éclaircie forte réservant au moins 2 à 3 brins par souche (cas des jeunes taillis).
- ⊙ **Martelage des brins** : marquage des brins en réserve par un griffage ou à la peinture, avec autant de marques sur chaque brin que de brins réservés.

La conduite du chêne vert en mélange avec le cèdre proposée présente l'avantage de mieux doser le peuplement, de diminuer le couvert du sous étage et la compétition interspécifique « cèdre–chêne vert » pour la lumière et pour l'eau, d'améliorer le tapis herbacé pour le parcours et de fournir, le cas échéant, du bois de feu pour les riverains.

Encadré 16. Application de la norme de densité (cédraie sur basalte)

Les paramètres dendrométriques des arbres forestiers présentent des liaisons, en général allométriques de type $[Y = X^a]$, qui reposent sur le principe que les variations simultanées des diverses dimensions peuvent être décrites approximativement par des relations linéaires entre leurs logarithmes. Ces relations peuvent résulter du jeu indépendant du taux de croissance affectant les diverses parties : volume, circonférence, hauteur.

La relation qui lie la densité du peuplement exprimée en nombre d'arbres à l'hectare (N) à la circonférence à hauteur d'homme à l'arbre de surface terrière moyenne (C_g) ou (arbre moyen) est de la forme /

$$N = k \cdot C_g^a \text{ ou } \text{Log } N = \text{Log } K + a \cdot \text{Log } C_g$$

Pour les placettes d'expérience de la cédraie sur basalte de la zone d'étude du Centre de Recherche Forestière de Rabat cette relation est de la forme :

$$\text{Log } N = 12,68 + 1,4565 \text{ Log } C_g \quad (1)$$

Le principe consiste à faire un inventaire préliminaire pour estimer la densité (N_1) et la circonférence à 1,30 m de l'arbre moyen du peuplement avant éclaircie (C_{g_1}) et fixer, selon le degré de plénitude du peuplement et des considérations sylvicoles, la circonférence à 1,30 m de l'arbre moyen (C_{g_2}). La densité optimale résiduelle (N_2) se calcule par l'expression (1).

Le nombre d'arbres à exploiter en éclaircie est alors : $n = N_1 - N_2$

Le martelage de la coupe se fera alors selon les consignes de martelage en rapport avec les directives de l'aménagement et les recommandations sylvicoles.



7.3 Guide 3 : Série «Futaie régulière sur calcaire»

Cette série, traitée en futaie régulière, est composée de peuplements de cèdre souvent en mélange par étages avec du chêne vert. Les états de développement des peuplements de cèdre varient par parcelles de l'état de gaulis à la vieille futaie. Les mesures à envisager dans ces peuplements dépendent de leurs états de développement ce qui a conduit l'aménagiste à les classer en deux groupes : groupe de régénération et groupe d'amélioration.

1. Caractéristiques de la série

- ⊙ La série, d'une superficie de 7 309 ha, est sur substrat carbonaté à dominance calcaire présentant les trois niveaux de potentialités.
- ⊙ La série comprend 2 groupes : *groupe de régénération et groupe d'amélioration*.
 - ◆ **Le groupe de régénération** couvre une superficie de 4 926 ha réparties sur 31 parcelles ; il est subdivisé en deux sous-groupes de régénération naturelle et de régénération assistée ou artificielle.
 - ◆ **Le groupe d'amélioration**, d'une superficie de 2383 ha, est réparti sur 20 parcelles. La densité à l'hectare du cèdre est comprise entre 150 et 200 tiges avec un maximum de 296 tiges et un minimum de 100 tiges à l'hectare. La majorité des parcelles de ce groupe sont dans des situations convenables (sensibilité moyenne à faible).
- ⊙ La répartition du dépérissement et de la mortalité est hétérogène diffuse ou par tâches, avec des surfaces importantes sur versants chauds et pentes fortes (cas des cédraies de Michlifen et Boutrouba); une bonne partie des peuplements se trouve dans les classes de sensibilité au dépérissement moyenne à forte.
- ⊙ Le chêne vert, omniprésent dans la plupart des parcelles, constitue le sous-étage du cèdre.

2. Directives d'aménagement

- ⊙ Maintien des objectifs et du classement des parcelles en vigueur.
- ⊙ Veiller à la régularisation de la structure du peuplement, surtout dans les parcelles 10, 18, 47 et 53 du Groupe d'amélioration.
- ⊙ Récolte des gros bois (C 1,30 m \geq 300 cm) du Groupe d'amélioration avant leur dépréciation (*figure 28*).
- ⊙ Consentir un effort important de régénération assistée et artificielle.

3. Recommandations de sylviculture

Les interventions sylvicoles proposées sont nuancées en fonction des niveaux de potentialités des milieux de la série. Ainsi, deux variantes sont analysées :

variante 1 : milieux sols profonds, expositions fraîches, pentes faibles, sensibilité faible.

variante 2 : milieux à sols superficiels, exposition chaude, pentes forte, sensibilité forte, mortalité massive.

A. Variante 1 : Sols profonds, Expositions fraîches, Pentes faibles, faible sensibilité

Dans ces milieux relativement favorables, la régénération des vieux peuplements par coupes progressives doit impérativement être assistée par recépage du chêne vert presque omniprésent. Le sol doit faire l'objet de nettoiements par arrachage de la végétation spontanée et des crochetages en vue de préparer un bon lit de semences.

Selon l'importance des fructifications sur les arbres, un ensemencement artificiel doit suppléer à l'insuffisance de celles-ci. De même, un dégagement précoce des semis doit être envisagé pour les mettre à l'abri de toute concurrence par la végétation spontanée. Le reboisement des vides créés par les anciennes coupes brutales peut aider à la reconstitution de la cédraie. Les interventions suivantes sont proposées :

1. Action dans le groupe de régénération

- ⊙ Réaliser 3 coupes au lieu de 2 prévues par l'aménagement en vigueur : une Coupe d'ensemencement, une coupe secondaire et une coupe définitive.
- ⊙ Adopter une rotation indicative des coupes de régénération de 8 ans.
- ⊙ Rajeunir le peuplement par voies naturelle et assistée.

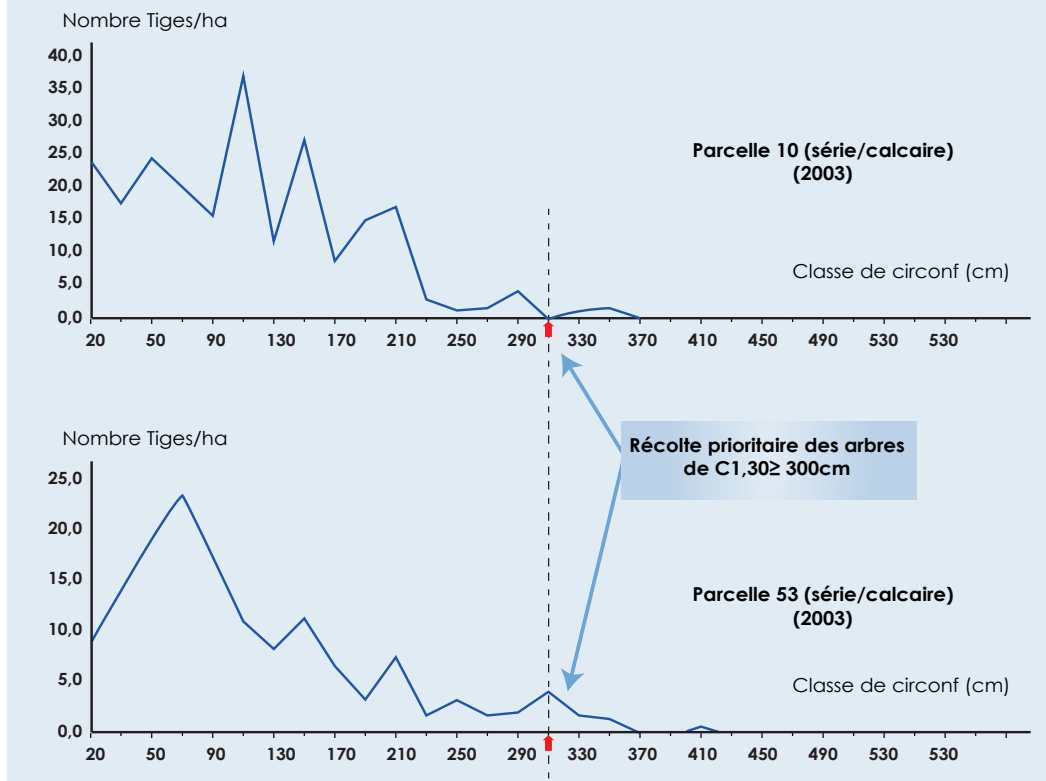
2 . Directives du martelage

- ⊙ Coupe d'ensemencement
 - ◆ **Interrompre le massif** : récoltes d'arbres sur le retour, dépérissants ou qui ne fructifient pas.
 - ◆ **Relever le couvert** : arrachage du sous-bois et dépressages intenses du chêne vert.
 - ◆ **Nettoyer le sol** : élimination des herbacées, crochetages et des labours localisés du sol.
 - ◆ **Ensemencement des parties travaillées** : en cas de fructifications absentes ou insuffisantes.
 - ◆ **Suivi des semis** : dégagement au besoin, (concurrence des herbacées).
 - ◆ **Mise en défens stricte** : clôtures, gardiennage, compensation.
- ⊙ Coupe secondaire
 - ◆ **Créer de nouveaux lits de semences**: récolter les vieux arbres devenus gênants pour les semis.
 - ◆ **Régénération assistée**: intensifier les travaux (crochetage du sol, ensemencement en cas d'insuffisance des fructifications).

- Coupe définitive

- ◆ Récolter les derniers arbres en réservant (20 à 40 semenciers à l'hectare), vigoureux et bien répartis qui sont les garants de l'ensemencement en cas d'accidents.
- ◆ Suivre la dynamique des semis.

Figure 28. Parcelles avec un excédent de vieux bois (Forêt d'Azrou)



3. Action dans le groupe d'amélioration

- Réaliser des coupes, en priorité, des arbres morts et des arbres dépérissants au stade 4, les vieux bois (C 1,30 mm > 300 cm. Concentrer les coupes sur période indicative de 5 ans (Figure 28).
- Pratique des éclaircies :
 - ◆ Adopter la rotation de 12 ans fixée par l'aménagement en vigueur.
 - ◆ En attendant la construction de normes de densités dans chaque faciès de la cédraie, l'intensité des éclaircies à réaliser dans l'immédiat, pourrait être évaluée en se référant au coefficient d'espacement Hart-Becking. ce coefficient doit être maintenu autour de 18 à 20 % (encadré 17).
 - ◆ Pratiquer des éclaircies mixtes qui soient des opérations de dosage du peuplement et de sélection pour préparer les parcelles de ce groupe à passer au groupe de régénération à la révision prochaine de l'aménagement en 2030.

Encadré 17. Application du coefficient d'espacement Hart-Becking

Le coefficient d'espacement Hart-Becking (S) est d'une application universelle chez les forestiers pour de calcul de l'intensité d'une éclaircie, Son expression mathématique est de la forme :

$$S (\%) = (a / Hd) \times 100$$

a = espacement moyen entre les arbres.

Hd = hauteur dominante du peuplement.

En toute rigueur ce coefficient suppose que les arbres du peuplement soient distribués en quinconce : chaque arbre est situé au sommet d'un triangle équilatéral de côté (*a*). Dans ces conditions, la densité optimale peut se calculer par l'expression :

$$N = [107,46 / (Hd * S)]^2 \quad (1)$$

A titre indicatif, le rapport entre la densité du peuplement et l'intensité de l'éclaircie est illustré par le schéma suivant:



Le principe consiste à faire un inventaire préliminaire pour estimer la densité (N1) et la hauteur dominante du peuplement avant éclaircie et fixer, selon le degré de plénitude du peuplement et des considérations sylvicoles, le coefficient (S %).

La densité optimale résiduelle (N2) se calcule par l'expression (1).

Le nombre d'arbres à exploiter en éclaircie est alors: $n = N1 - N2$

Le martelage de la coupe se fera alors selon les consignes de martelage en rapport avec les directives de l'aménagement et les recommandations sylvicoles.

⊙ Concernant le chêne vert

- ◆ **Prévoir 2 rotations** de 12 ans au lieu d'une rotation à 24 ans prévue par l'aménagement en vigueur.
- ◆ **1^{ère} rotation** : Réaliser des dépressages avec un prélèvement de 50 à 60% des brins par cépée avec la coupe en priorité des brins traitants et des brins dominés.
- ◆ **2^{ème} rotation** : Réaliser un éclaircie forte réservant au moins 2 à 3 brins par 2 à 3 brins par souche (cas des jeunes taillis).
- ◆ **Martelage des brins** : marquage les brins en réserve par un griffage ou à la peinture, avec autant de marques sur chaque brin que de brins réservés.

B. Variante 2: Sols superficiels, expositions chaudes, pentes fortes, forte sensibilité mortalité massive

Dans ces milieux difficiles où le cèdre est éradiqué, parfois, par les coupes d'assainissement, le recours à l'enrésinement s'impose. Maintenir cette essence noble dans ces milieux difficiles est très problématique, voire impossible dans le contexte des changements climatiques actuels. Deux types d'interventions s'imposent dans ces milieux: la conversion des taillis de chêne vert et la réhabilitation des milieux par enrésinement. Les interventions suivantes sont proposées :

- Conversion des taillis bienvenant de chêne vert en futaie sur souche par dépressages:
 - ◆ Prévoir 2 rotations de 12 ans durant par l'aménagement en vigueur:
 - 1^{ère} rotation** : Réaliser des dépressages avec un prélèvement de 50 à 60% des brins par cépée avec la coupe en priorité des brins traitants et des brins dominés.
 - 2^{ème} rotation** : Réaliser un éclaircie forte réservant au moins 2 à 3 brins par 2 à 3 brins par souche (cas des jeunes taillis).
 - ◆ **Martelage des brins**: marquage les brins en réserve par un griffage ou à la peinture, avec autant de marques sur chaque brins que de brins réservés.
- Réhabilitation du milieu par enrésinement pionnier:
 - ◆ Introduire le pin maritime de montagne sur calcaire dolomitique et dolomie aux altitudes ≤1800 m, (provenance locale de Tamrabta).
 - ◆ Conduire des essais prospectifs sur calcaire et stations difficiles, aux altitudes 1500 à 2000 m, avec différentes provenances d'essences rustiques (cyprès de l'Atlas, cèdre, pin maritime, etc.).
 - ◆ Itinéraire technique préconisé
 - Nettoiements localisés sur une largeur de 3 m en bandes de niveau.
 - Tracé en courbes de niveau et ouverture de potets cubiques de dimensions 60 x 60 x 60 cm; Densité moyenne 800 à 1200 plants/ha.
 - Date de plantation : octobre–novembre avant la tombée des neiges.
 - Entretiens de l'hiver- printemps durant deux ans 2 ans.
 - Suivi des plantations.

8. Guides de sylviculture de la forêt d'Ait Youssi

8.1 Caractéristiques de la forêt

La forêt d'Ait Youssi, bien que placée dans une ambiance climatique semblable à celle de la forêt d'Azrou, elle se distingue par les éléments spécifiques suivants :

- ⦿ La forêt est sur substrat à dominance dolomie sableuse ; la texture du sol est dominée par une forte proportion de sable à partir de 30 centimètres de profondeur, ce qui amplifie le stress hydrique du cèdre lorsque la pente du terrain est forte.
- ⦿ La sensibilité au dépérissement montre que la majorité des parcelles est dans la classe de sensibilité moyenne à forte (§ 3.3).
- ⦿ Le dépérissement et la mortalité du cèdre sont hétérogènes : diffus ou par taches de surfaces importantes sur pentes fortes et sur versants chauds ; ces phénomènes touchent quasiment la moitié de la forêt inventoriée (*figure 19*).
- ⦿ La densité des peuplements est relativement forte avec le chêne vert, omniprésent à l'état de taillis (*figure 18*).
- ⦿ La forêt, entièrement incluse dans la zone d'utilisation des ressources naturelles du parc, est divisée en 3 séries : une série de futaie régulière de cèdre, une série de futaie jardinée et une série de chêne vert. composée de peuplements à régénérer et à améliorer.
- ⦿ la forêt d'Ait Youssi a été aménagée en 1984 pour une période de 24 ans. Avec la création du Parc National d'Ifrane en 2004, son aménagement a été adapté à ce nouveau statut mais, il a pris fin en 2007.
- ⦿ La forêt subit une forte pression anthropique (parcours et bois de feu); les mises en défens des peuplements en régénération sont constamment violées. En conséquence, le calendrier des coupes de régénération n'a pu être respecté, de telle sorte qu'à la fin de l'aménagement, la forêt se présente à l'état de vieille futaie avec un surstockage de bois sur pied.

8.2 Guide 4: Série « Futaie régulière sur calcaire »

Directives d'aménagement et sylviculture

- ⦿ La réadaptation de l'aménagement est urgente en raison de l'ampleur du dépérissement et du vieillissement de la forêt. Toutefois, la méthode d'aménagement à retenir doit être un compromis, d'une part, entre, le souci de préserver l'écosystème, ses fonctions et son rendement soutenu et, d'autre part, les sujétions imposées au massif forestier par le pâturage et l'exploitation du bois de feu par les riverains.

- ⊙ Dans cette forêt dominée par des sols sablonneux filtrants, les stress hydriques sont toujours à craindre sur les versants en pente. Les travaux de conservation de l'eau et du sol sont partout nécessaires : ils améliorent le bilan hydrique du sol, réduisent le phénomène de l'érosion et constituent un excellent lit de semences pour les semis naturels. Les travaux envisagés consistent à ouvrir des éléments de banquettes sur fossé ou des éléments de gradins.
- ⊙ Les propositions d'actions d'aménagement et de sylviculture, serviront plutôt pour mieux orienter le futur aménagement quant au choix approprié d'un modèle de gestion de cette forêt. Ces interventions tiendront compte de ces contraintes édaphiques et topographiques et du surstockage important du matériel ligneux sur pied.
- ⊙ Les interventions sylvicoles proposées sont nuancées en fonction des niveaux de potentialités des milieux de la série. Ainsi, deux variantes sont analysées comme dans le cas de la forêt d'Azrou: variante 1: milieux sols profonds, expositions fraîches, pentes faibles, sensibilité faible et variante 2: milieux à sols superficiels, exposition chaude, pentes fortes, sensibilité forte, mortalité massive.

A. Variante 1 : Sols profonds, expositions fraîches, pentes faibles, faible sensibilité

1 . Action sur le groupe de régénération

- ⊙ **Rajeunir le peuplement** : prévoir la méthode des coupes progressives pour la régénération, au moins 3 coupes : une coupe d'ensemencement, une coupe secondaire et une coupe définitive durant l'application de l'aménagement.
- ⊙ **Adopter une rotation souple** pour mieux répondre aux exigences des jeunes semis vis-à-vis de la lumière et de l'eau (protection ou nuisance du peuplement sur pied).
- ⊙ **Intensifier la régénération** assistée par application des techniques évoquées ci-dessus.
- ⊙ **Améliorent le bilan hydrique du sol**: ouverture d'éléments de banquettes sur fossé décrits ci-dessus ou élément de gradins de 60 à 70 cm de large, comme lits de semences.
- ⊙ **Appliquer les directives de martelage** proposées pour le groupe de régénération de la forêt d'Azrou.

2 . Action sur le groupe d'amélioration

- ⊙ La carte de densité fait état d'une forte plénitude du cèdre ; la surface terrière moyenne est l'ordre de 32,8 m² à l'hectare.
- ⊙ En attendant la révision de l'aménagement, il est recommandé de réaliser une première éclaircie par le bas, sur la base d'un coefficient d'espacement Hart-Becking de 22 à 25 %, de manière à réduire le surstockage du bois sur pied, considéré comme l'un des facteurs déclenchant le dépérissement (*encadré 18*).

Encadré 18. Conditions et techniques de rajeunissement de cédraie par voie artificielle: peuplement en futaie régulière sur calcaire et dolomie sableuse

⊙ Conditions générales

Le tempérament délicat du cèdre (chapitre 4), *a fortiori*, sur substrat calcaire (chapitre 5), ne présage nullement obtenir une régénération par voie naturelle, dans l'état actuel des modifications climatiques et de la pression anthropique. **La mise en œuvre de moyens techniques et matériels pour gagner ce défi s'impose à l'évidence.**

Le reboisement des vides créés par les anciennes coupes d'assainissement et des peuplements clairsemés sur des bas fonds et des pentes douces, peut contribuer à la reconstitution de la cédraie dans ces milieux. Toutefois, la régénération artificielle a pratiquement les mêmes exigences que la régénération naturelle ; elle nécessite une amélioration radicale des techniques de reboisement. Quoique une mutation de la méthode d'élevage des plants soit récemment en cours à la pépinière d'Azrou, il n'en demeure pas moins vrai que les caractéristiques des portoirs alvéolés et du substrat de culture utilisés méritent d'être redéfinis sur la base d'expérimentations, à l'instar du chêne-liège en Maamora (Souli, 2004 ; El Ghazi, 2006; Nahidi, 2007).

Dans ce cas, un nettoyage systématique de la végétation spontanée suivi d'un travail soigné du sol est garant de succès. De même, améliorer le bilan hydrique du sol dans ces substrats filtrants et favoriser l'installation des semis sur les remblais fraîchement préparés, des travaux appropriés de conservation de l'eau sur les versants en pente, sont vivement recommandés. Un itinéraire technique, que le gestionnaire doit adapter en fonction des situations en présence, est proposé ci-après.

⊙ Itinéraire technique

- Nettoyage systématique de la végétation spontanée avec réserve des semenciers.
- Préparation du sol : procéder à l'ouverture d'éléments de banquettes sur fossé en courbes de niveau, d'une largeur, profondeur et longueur respectivement égales à (0,60 x 0,60 x 3 m).
- Densité -espacement : espacement de 3 m entre fossés sur la courbe et de 4 m entre deux courbes successives; plantation à l'intérieur du sillon ou sur le fossé (2 plants par élément) avec ensemencement de la banquette.
- Epoque de plantation : en général, fin octobre à début décembre, après la reconstitution de la réserve en eau du sol (50 à 1000 mm de pluie) et avant la chute des neiges.



⦿ Suivi des plantations :

- *Entretiens des plants et semis par désherbages et binages deux fois par an pendant 3 à 4 années de suite, au début et à la fin du printemps.*
- *Arrosages des plants au 1^{er} et 2^{ème} été en année sèche, le cas échéant, en particulier, sur les substrats à dolomie sableuse.*
- *Mise en défens des plantations 10 à 15 ans en fonction du potentiel de croissance des plants.*
- *Pratiquer des éclaircies mixtes, avec priorité aux arbres morts et dépérissants, qui soient des opérations de dosage du peuplement et de sélection pour réduire la concurrence et améliorer la croissance.*
- *Réaliser au cours des opérations d'éclaircie, de dépressages intenses du chêne vert dominant le sous étage avec un prélèvement de 50 à 60% des brins par cépée, avec la coupe en priorité des brins traitants et des brins dominés.*



B. Variante 2 : Sols superficiels, expositions chaudes, pentes fortes, forte sensibilité, mortalité massive

Dans ces milieux difficiles où le cèdre est éradiqué, parfois, par les coupes d'assainissement, le recours à l'enrésinement s'impose. Deux types d'interventions sont proposés dans ces milieux comme dans le cas de la forêt d'Azrou : la conversion des taillis de chêne vert et la réhabilitation des milieux par enrésinement. Les interventions proposées pour la série «*Futaie régulière sur calcaire, variante 2*» de la forêt d'Azrou sont applicables à cette variante de la forêt d'Ait Youssi.

L'encadré 19 présente les conditions et l'itinéraire technique pour le rajeunissement des futaies régulières sur calcaires

8.3 Guide 5 : Série Futaie jardinée sur calcaire

1. Caractéristiques de la série

- ⦿ Le traitement en futaie jardinée est inappropriée pour ce type de forêt grevée de droit d'usage et soumise à une forte pression anthropique, en particulier le pâturage.
- ⦿ Ce type de traitement ne permet pas la mise en défens d'une partie de la forêt, car chaque parcelle de la série est parcourue au même moment par des coupes de régénération et de coupes d'amélioration, ce qui rend la gestion très délicate.

2. Directives d'aménagement

Prévoir la méthode de conversion en futaie régulière du peuplement. L'exemple de la forêt de pin maritime de Tamrabta est éloquent. Cette pinède, aménagée en 1940 par la méthode de la futaie jardinée, est convertie en futaie régulière par l'aménagement en vigueur. Cette conversion a été justifiée par les mêmes contraintes que se partagent ces deux forêts voisines.

3. Recommandations de sylviculture

- Appliquer le programme d'intervention d'urgence (*encadré 10*) en attente de la réadaptation de l'aménagement.
- Réaliser, des dépressages intenses et des éclaircies fortes le jeune taillis de chêne vert dominant les sous étage avec un prélèvement de 50 à 60 % des brins par cépée Le chêne vert.
- Cette opération permet, de diminuer le couvert et la compétition interspécifique «cèdre-chêne vert» pour la lumière et pour l'eau, d'améliorer le tapis herbacé pour le parcours et de fournir, le cas échéant, du bois de feu pour les riverains.

L'*encadré 19* ci-après donne les parcelles à parcourir en coupe en priorité durant la période d'application de l'aménagement en vigueur, relativement aux guides de sylviculture, aux massifs forestiers, aux séries et au groupe de régénération, d'amélioration et de jardinage.

Encadré 19. Parcelles prioritaires à parcourir en coupes sylvicoles

Guide de sylviculture	Forêt	Série/unité de gestion	Parcelles prioritaires
GUIDE 1	Azrou	Série de protection intégrale	3, 71, 73, 76 et 77_
GUIDE 2	-	Série futaie régulière sur basalte Groupe d'amélioration	40, 29, 36, 44 et 119,
GUIDE 3	-	Série futaie régulière sur calcaire	
		Groupes de régénération	12, 28, 48, 54, 59, 62, 74, 117 et 118
		Groupes d'amélioration	37, 47, 50, 53 et 63
GUIDE 4	Ait Youssi	Série futaie régulière sur calcaire	
		Groupes de régénération	10, 11 et 18 3, 15, 17 20, 23 et 24
		Groupes d'amélioration	4, 6 et 9
GUIDE 5	-	Série futaie jardinée sur calcaire	17, 24, 16

Conclusions et recommandations

Conclusions générales

L'étude des causes de dépérissement de la cédraie du Moyen Atlas, objet de la «Convention UTF/MOR/028/MOR: Appui à la mise en œuvre du Programme forestier national», concerne deux massifs forestiers: la forêt d'Azrou et la forêt d'Ait Youssi Amekla, qui relèvent de la province d'Ifrane. Ces massifs, d'une superficie de 20940 ha, constituent un échantillon représentatif de la cédraie du Moyen Atlas marocain.

Les principaux objectifs des investigations pluridisciplinaires, prévues dans le cadre de cette projet, consistent à caractériser le lien des causes et des symptômes pouvant expliquer le phénomène de dépérissement observé dans la région et, définir une stratégie de gestion et de protection de la cédraie sous forme d'outils de gestion à court, à moyen et à long terme. Pour ce faire, les thématiques identifiées, eu égard à l'état des connaissances sur les dommages causés au cèdre et les agents causaux de ces dommages, concernent des analyses et de diagnostics en rapport avec **la bioclimatologie, la dendrochronologie, l'écophysiologie, les sciences du sol, l'entomologie, la phytopathologie, la dendrométrie, la biométrie, le système d'information géographique et l'aménagement forestier**. Les travaux de l'étude se sont déroulés pendant 36 mois, (septembre 2005- septembre 2008).

Le support expérimental, à travers lequel sont recherchées les relations explicatives entre la santé du cèdre et les divers facteurs explicatifs (effets directs ou produits d'interaction) relevant de toutes les disciplines concernées dans l'étude, est **un protocole d'échantillonnage unifié, de type aléatoire simple probabiliste avec un échantillon de 54 placettes dont deux placettes témoins contenant des peuplements sains**. Ce modèle présente l'avantage de garantir une certaine qualité de représentation des différentes composantes du milieu de l'espace étudié et de mieux appréhender l'analyse des interrelations entre les thématiques.

L'approche méthodologique de l'étude repose sur le protocole unifié d'échantillonnage et comporte deux types d'investigations:

Travaux thématiques spécifiques: ces travaux, à l'échelle de l'arbre et du peuplement, sont à caractères biotiques (entomologie) ou abiotiques (écophysiologie, bioclimatologie, édaphologie, dendrochronologie...); ils permettent de définir et de préciser le niveau d'action des facteurs quant au dépérissement: facteurs prédisposant, déclenchant ou aggravants et d'élaborer des indicateurs à cet effet.

Inventaire et aménagement forestier: à l'échelle de la placette, il s'agit de fournir des paramètres dendrométriques fiables relatives aux arbres sains, morts et dépéris en rapport avec les antécédents sylvicoles (inventaire phytosanitaire) et de proposer, compte tenu des résultats des études thématiques, un plan de gestion durable de la cédraie, objet de l'étude.

Les analyses thématiques entreprises de façon interdisciplinaire, avec des approches scientifiques solidement établies, ont permis de décrire et d'analyser pour mieux, comprendre et d'évaluer l'impact des différents facteurs écologiques, anthropiques et sylvicoles, pris isolément, sur la santé des peuplements de cèdre de l'Atlas, mais aussi d'appréhender la complexité de leurs relations. En effet, cette analyse montre que le phénomène de dépérissement est le produit d'un cumul de stress de plusieurs facteurs sur plusieurs années. La recherche d'une approche globale, qui met en jeu causes et effets, c'est-à-dire facteurs stationnels, sylvicoles et état de santé des peuplements, est alors nécessaire.

Pour ce faire, l'analyse des données multidimensionnelle, la cartographie et le SIG ont permis de mettre en évidence une série de facteurs actifs impliqués dans le phénomène de dépérissement, leur hiérarchie et leur variabilité spatiale et temporelle. **La solution consiste alors à faire progresser de façon concomitante le modèle causal et les analyses multivariées pour mieux appréhender les liens de causalité et orienter l'élaboration d'un programme d'action et de guides de sylviculture à l'usage des gestionnaires.**

D'une manière générale, le phénomène de dépérissement passe par deux phases qui se succèdent dans le temps :

- Une première phase marquée par le dysfonctionnement des peuplements de cèdre suite aux sécheresses récurrentes associées à l'absence d'une sylviculture permettant d'équilibrer la densité et la structure des peuplements aux disponibilités hydriques des sols et aux conditions écologiques des habitats.
- Dans la seconde phase, le processus de dépérissement se déclenche, amplifié par l'effet du stress hydrique sur des arbres dans des situations défavorables, en particulier, les stations à sols superficiels sur pentes et expositions chaudes.

Ainsi, l'élaboration du programme d'action pour la gestion et la protection de la cédraie, sous forme de guides de sylviculture comme outils de gestion, est fondée sur les résultats de toutes ces analyses, et plus particulièrement:

- Les niveaux de potentialités des milieux définis.
- L'intensité du dépérissement définis par l'indice et la carte de sensibilité au dépérissement, et la carte des densités.
- Le zonage du Parc National d'Ifrane qui incluse les massifs étudiés ; (zone naturelle protégée, sanctuaire naturel et zone de gestion des ressources naturelles).
- Le mode de traitement illustré dans cette étude par la structure du peuplement (régulière ou irrégulière).
- Les prescriptions des aménagements en vigueur.
- Le parcellaire existant des deux forêts. Les guides de sylviculture sont élaborés au niveau de chaque forêt (forêt d'Azrou et forêt d'Ait Youssi).

Les propositions et recommandations présentées dans les guides de sylvicultures établis s'organisent autour des trois éléments principaux suivants :

- ⦿ Caractéristiques dominantes de la série (milieux et potentialités, nature et intensité du dépérissement).
- ⦿ Directives d'aménagement (choix des objectifs, classements des parcelles, structures finale du peuplement, rotations des coupes et du niveau et types de régénération à entreprendre).
- ⦿ Recommandations de sylviculture (nombre et techniques des coupes, modalités d'exécution des coupes des dépérissants, modalités d'utilisation des normes de densité et de traitement du chêne vert techniques de martelage des coupes et techniques de reconstitution de la cédraie. Le tableau ci-après présente les guides de sylviculture élaborés pour deux massifs forestiers d'Azrou et d'Aït Youssi.

Recommandations pour la mise en œuvre des résultats et acquis de l'étude

Les guides de sylviculture sont présentés sous forme de recommandations claires et précises pour mieux faciliter leur mise en application par les gestionnaires. **IL n'en demeure pas moins vrai que les guides proposées, si nuancés soient-ils, ne dispenseront jamais les gestionnaires, au niveau des interventions, de faire preuve de pragmatisme et de doigté pour adapter en chaque endroit l'application du guide.**

Quel que soit le niveau de pertinence des guides de sylviculture élaborés, Il est recommandé au gestionnaire de garder à l'esprit les éléments constants suivants pour mener ses interventions, et plus particulièrement:

- ⦿ Préservation et maintien autant que possible des peuplements de cèdre.
- ⦿ Réhabilitation des milieux sur les versants où le cèdre est éradiqué par les coupes d'assainissement.
- ⦿ Exploitation des arbres morts et valorisation de leur bois avant sa dépréciation.
- ⦿ Action en faveur du chêne vert dans les milieux difficiles ou devenus impropres pour le cèdre.

L'action sylvicole prioritaire consiste à réaliser des coupes d'assainissement dans les deux forêts. **Il est recommandé** que ces exploitations se limitent à des prélèvements systématiques de tous les arbres morts et **les arbres dépérissants de la classe 4 (100% de perte foliaire) et de la classe 3 quand la perte foliaire dépasse 60%. La forte amplitude de cette dernière classe (50 à 100 % de perte foliaire), augure d'une reprise d'une partie des arbres, dont le taux de perte foliaire est inférieur à 60%**, en cas d'année pluvieuse favorable.

Une période indicative de 5 ans est recommandée pour accomplir les opérations d'assainissement. La priorité sera donnée aux parcelles 75, 80, 91, 103 et 110 dans la forêt d'Azrou et aux parcelles 4, 15, 17, 20, 23 et 24 dans la forêt d'Aït Youssi, où les arbres sont tous morts sur certains versants.

L'évolution des paramètres climatiques échappe au contrôle du gestionnaire. Aussi, l'accent doit-il être mis davantage sur une sylviculture écologique préventive. L'application d'une sylviculture raisonnée, par le dosage des éclaircies, des coupes d'amélioration et des coupes préparatoires à la régénération des peuplements est recommandée.

Ce type de sylviculture, qui repose sur un suivi rapproché des peuplements, nécessite la définition de normes de densités qui doivent orienter le type et la nature des coupes d'amélioration. Pour ce faire, il est recommandé d'appliquer, de façon rigoureuse, les normes proposées dans les guides et de respecter les programmes des éclaircies. Ces normes doivent permettre de maintenir un équilibre entre le «peuplement qui présente une certaine surface transpirante» et «les réserves hydriques utiles offertes par le sol supportant le peuplement en question».

L'aménagement concerté de la forêt d'Azrou, est marqué de prudence quant à l'application rigoureuse des techniques préconisées par la méthode de régénération par coupes progressives auxquelles est soumis ce massif. Il est recommandé d'adapter et de compléter le plan de gestion de ce massif par les propositions des guides 1, 2 et 3.

L'aménagement de la forêt d'Ait Youssi a pris fin en 2007 alors que les interventions dans ce massif sont plus axées sur des coupes d'assainissement du cèdre, avec une ampleur importante, et vers la régénération artificielle par plantation.

A cet effet, il est recommandé que les propositions d'actions d'aménagement et de sylviculture des guides proposés, soient utilisées plutôt pour mieux orienter l'élaboration du futur aménagement quant au choix approprié d'un modèle de gestion de cette forêt.

La série futaie jardinée sur calcaire de la forêt d'Ait Youssi est incompatible avec les contraintes sociales de la région ; elle est difficile à gérer. D'ailleurs, dans les 6 parcelles qui composent cette série, la mortalité du cèdre est massive dans les parcelles 17 et 24 et forte dans la parcelle 16. La régularisation de la structure des peuplements de cette série est vivement recommandée. Des consignes précises de sylvicultures, découleraient du nouvel inventaire qui sera réalisé dans le cadre de la révision de l'aménagement de cette forêt.

Le tempérament délicat du cèdre, à fortiori, sur substrat calcaire, ne présage nullement d'obtenir une régénération par voie naturelle, dans l'état actuel des modifications climatiques et de la pression anthropique. La mise en œuvre de moyens techniques et matériels s'impose. Pour ce faire, il est recommandé d'appliquer les conditions et techniques de rajeunissement de cédraie par voie artificielle: peuplement en futaie régulière sur calcaire et dolomie sableuse, proposées par le guide de sylviculture.

Il est recommandé de parcourir en coupes sylvoles les parcelles prioritaires ci-après durant la période de l'aménagement en vigueur :

Guide de sylviculture	Forêt	Série/unité de gestion	Parcelles prioritaires
GUIDE 1	Azrou	Série de protection intégrale	3, 71, 73, 76 et 77
GUIDE 2		Série futaie régulière sur basalte Groupe d'amélioration	40, 29, 36, 44 et 119,
GUIDE 3		Série futaie régulière sur calcaire	
		Groupes de régénération	12, 28, 48, 54, 59, 62, 74, 117 et 118
		Groupes d'amélioration	37, 47, 50, 53 et 63
GUIDE 4	Ait Youssi	Série futaie régulière sur calcaire	
		Groupes de régénération	10, 11 et 18 3, 15, 17 20, 23 et 24
		Groupes d'amélioration	4, 6 et 9
GUIDE 5		Série futaie jardinée sur calcaire	17, 24, 16

Recommandations à plus long terme nécessitant un effort de recherche

Les études et recherches entreprises dans le cadre de cette étude méritent d'être poursuivie et renforcées, dans le cadre des programmes de recherche du HCEFLCD, suivant deux axes principaux.

L'axe 1 «fonctionnement de l'écosystème cédraie» aura pour objectif d'approfondir et préciser les relations « peuplement – sol - eau et diversité biologique » en rapport avec la tendance aux changements climatiques et **l'axe 2 «sylviculture –aménagement»** visera la maîtrise des outils d'aide à la décision pour une gestion durable de la cédraie sous contraintes

Concernant l'axe 1, il est recommandé d'engager les actions de recherche suivantes:

- ⊙ Poursuivre les investigations dendrochronologiques et écophysologiques dans des stations représentatives de la sensibilité ; inclure le chêne vert.
- ⊙ Assurer le suivi de l'humidité du sol sur le réseau des 14 placettes choisies, pour intégrer la variabilité temporelle des résultats dans la surveillance du régime hydrique et du stock d'eau des sols de cette zone.
- ⊙ Évaluer l'interception des précipitations en fonction des types des peuplements en vue de quantifier les pertes d'eau par le couvert forestier et évaluer le bilan hydrologique avec précision. L'interception, qui est liée au type et à la densité des peuplements, peut être à l'origine des pertes importantes des précipitations.
- ⊙ Étudier la biologie de *Phaenops marmottani* : indices de présence précoces, dégâts et seuils d'attaques, ennemis naturels ; parasites et de sa phéromone sexuelle ce qui permettrait d'engager un programme de lutte contre le ravageur.
- ⊙ Explorer la diversité phénotypique intraspécifique et individuelle en relation avec le comportement vis-à-vis la sécheresse, (géotypes résistant à la sécheresse).

Concernant l'axe 2, il est recommandé d'engager les actions de recherche suivantes :

- ⦿ Concevoir et mettre en place un dispositif permanent pour le suivi des peuplements et pour l'élaboration d'outils d'aide à la décision en matière d'aménagement et de gestion.
- ⦿ Élaborer et mettre en œuvre des « tables de cubage, tables de production, modèles de croissance sous la contrainte « sensibilité au dépérissement ».
- ⦿ Établir des normes de densités en fonction des types de peuplements sur la base des relations d'équilibre avec les conditions des stations et non seulement des caractéristiques sylvicoles des peuplements et définir un espacement vital optimal de croissance pour la conduite des éclaircies.
- ⦿ Construire et valider des modèles de prédiction des mortalités et dépérissements comme outil d'aide à la décision de la gestion.
- ⦿ Dans le cas des programmes de reboisement du cèdre de l'Atlas, conduire des essais sur les techniques de travail du sol qui permettent d'améliorer les réserves hydriques des sols et leur disponibilité en eau et sur les standards d'élevage des plants.
- ⦿ Conduire des essais de reboisement prospectifs sur des milieux sur substrat calcaire et sur stations difficiles, aux altitudes 1500 à 2000 m, utilisant des espèces forestières pionnières (Pin maritimes de montagnes, provenances de cèdre, cyprès de l'Atlas, etc.).

REMERCIEMENTS

Le présent ouvrage est élaboré, dans le cadre de la « Convention UTF/MOR/028/MOR : Appui à la mise en œuvre du Programme Forestier National », par une équipe multidisciplinaire de consultants experts : Omar Mhirit (coordonateur), Abdelaziz Mokrim (bioclimatologie et dendrochronologie), A. Zine El Abidine (écophysiologie), Mustapha Chouraichi (sol et nutrition minérale des arbres), Mohamed Mouna (entomologie), Mohamed Ettobi, (inventaire dendrométrique et phytosanitaire), Belghazi Bakhyi (aménagement forestier et guides de sylviculture), Allal M'hamdi (écologie quantitative et analyse des données) et Mohamed Rouchdi, (SIG, cartographie et base de données), en étroite collaboration et appui technique de Fouad Assali et Taoufik Adel du service de la protection des forêts (HCEFLCD) et de Mme Guillian Allard et de Michel Malaghoux de la FAO-Rome.

Cette étude a bénéficié d'une large collaboration, à tous les niveaux, pour sa réalisation. La Direction Nationale du Projet (DNP), le personnel de la Représentation de la FAO à Rabat, le service de la coopération du Haut Commissariat aux Eaux et Forêts et à la Lutte contre la Désertification (HCEFLCD), de nombreux responsables et de nombreuses personnes de la communauté forestière et de spécialistes de différentes disciplines ayant trait à la foresterie et aux sciences du vivant, ont largement contribué, par leur appui, leurs conseils et leurs réflexions, à orienter l'itinéraire de ce travail. Leur soutien et leur encouragement ont permis son aboutissement.

L'appui documentaire de nombreux services centraux du Haut Commissariat aux Eaux et Forêts et à la Lutte Contre la Désertification à Rabat, a été très bénéfique pour la constitution de la base de données nécessaire au lancement et au déroulement des travaux. La Direction de la Lutte Contre la Désertification de la Protection de la nature, la Direction du Centre de Recherches forestières, la Division de l'Aménagement des Forêts et des Parcours, et le Service de l'Inventaire Forestier National ont joué un rôle clé à cet effet.

L'appui humain, matériel et logistique fournis par l'ensemble des responsables de la Direction Régionale des Eaux et Forêts et de la Lutte Contre la Désertification du Moyen-Atlas à Meknès et les responsables du Centre de Conservation et de Développement Forestier à Azrou, a été des plus efficaces. Sur le terrain, l'ensemble des forestiers rencontrés, indépendamment de leur grade ou de leurs responsabilités, ont été continuellement animés de bonne volonté ; ils ont accompagné sans relâche le déroulement de toutes les phases de l'étude.

C'est pour le HCEFLCD un agréable devoir que d'exprimer ses vifs remerciements à toutes ces personnalités pour leur appui et leurs avis qui ont largement facilité la réalisation de ce travail et enrichi ses résultats et ses conclusions.

Documents consultés

1. Sylviculture et aménagement : gestion antérieure des forêts

- 1) Abouelasoued B., 2005. Cartographie et caractérisation du dépérissement du cèdre dans le Moyen Atlas : cas de la forêt d'Azrou. Mém. 3^{ième} cycle, ENFI, Salé, 66 p.
- 2) Achehboune J., 2006. Etat actuel du dépérissement du cèdre de l'Atlas au Moyen Atlas central en relation avec la station et la sylviculture. Cas des forêts de Jbel Aoua sud et Aït Youssi de l'Amekla (canton de Lalla Mimouna). Mém. 3^{ième} cycle, ENFI, Salé, 78 p.
- 3) Aussenac G., 1983. Le cèdre, essai d'interprétation bioclimatique et écophysologique. In pré rapport colloque de bioclimatologie méditerranéenne, 18-20 mai. CNRS, Montpellier, IV 1-1, 1-8.
- 4) Bâaris M., 1994. Relation sol - régénération naturelle de la cédraie du Moyen Atlas : cas des parcelles clôturées d'Ouiouane, Ajdir et Itzer. Mém. 3^{ième} cycle, ENFI, Salé, 112 p.
- 5) Bahmad M., 1992. Contribution à l'étude la régénération naturelle du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Mann.) dans les parcelles clôturées (Cas du Moyen Atlas). Mém. 3^{ième} cycle, ENFI, Salé, 117 P.
- 6) Baillargeon G., Rainville J., 1977. Statistique appliquée. Les Editions SMG, Trois Rivières, Qué., T. 2, 594 p.
- 7) Benabid A., 1982. Bref aperçu sur la zonation altitudinale de la végétation climatique du Maroc. *Ecologia Mediterranea*, Marseille, III, 1/2, 301-315.
- 8) Benzékri, 1973. L'analyse des données. Vol. 2 : l'analyse des correspondances. Dunod, Paris, 615 p.
- 9) Daget Ph et Godron M., 1982. Analyse de l'écologie des espèces dans les communautés. Masson, collection d'écologie. , 163 p.
- 10) Drapper NR. et Smith H. 1981. Applied regression analysis. John Wiley and Sons, 709 p.
- 11) Duchaufour Ph., 1951. Note sur l'influence de la concurrence et de la perméabilité sur la régénération de certaines espèces forestières (Mélèze et cèdre). 70^{ème} congrès Assoc. Fr. pour l'avancement des Sc., Tunisie, 422 p.
- 12) Ezzahiri M., 1989. Application de l'analyse numérique à l'étude phytoécologique et sylvicole de la cédraie du Moyen Atlas tabulaire : l'exemple de la cédraie de Sidi M'Guild. Thèse ès sciences agronomique, IAV Hassan II, Rabat, 163 p.
- 13) Ezzahiri M., Belghazi B., Bahmad M., 1999. Etude de la régénération du cèdre de l'Atlas en fonction des propriétés physico chimiques du sol des parcelles clôturées de Ouiouane, Ajdir et Itzer. *An. Rech. For.*, CNRF, Rabat, T. 32, 44-53.
- 14) Godron M., 1971. Essai sur une approche probabiliste de l'écologie des végétaux. Thèse doct. Etat, USTL, Montpellier, 247 p.
- 15) HCEFLCD, 2006. Etudes d'aménagement concerté des forêts et parcours de la province d'Ifrane : PV d'aménagement de la forêt d'Azrou. 118 p.
- 16) Lepoutre B., 1964. Premier essai de synthèse sur le mécanisme de régénération du cèdre dans le Moyen Atlas marocain. *Ann. Rech. For. Du Maroc*, 7 (1), 55-163.
- 17) Lecompte M. et Lepoutre B., 1975. Bilan de l'eau et conditions d'existence de la cédraie dans le Moyen Atlas basaltique (Maroc). *Ann. Rech. For. Au Maroc*, Rabat, 15, 151-269.
- 18) Marion 1955. La régénération naturelle du cèdre dans les cédraies du rebord septentrional du Moyen Atlas occidental calcaire. *Ann. Rech. For. Au Maroc*, SRF, fasc. 1, Rabat.
- 19) M'hirit O., 1987. Etat actuel des connaissances sur le cèdre. Eléments pour un programme de recherche. Organisation des nations unies pour l'alimentation.(FAO) Rome.
- 20) Nahidi A., 2007. Evaluation de la qualité des plants de chêne-liège de plaine (forêt de la Mâamora) en relation avec le conteneur et le substrat. Mém. 3^{ième} cycle, ENFI, Salé, 64 p.
- 21) Pujos, 1966. Les milieux de la cédraie marocaine. *Ann. Rech. For. Au Maroc*, 8, 283 p.
- 22) Sâafadi M., 2003. Contribution à l'évaluation des reboisements du cèdre de l'Atlas dans le Moyen Atlas

- central. Mém. 3^{ième} cycle, ENFI, Salé, 59 p.
- 23) Toth J., 1973. Contribution à l'étude de la dissémination des graines de cèdre sur la face sud du Mont Ventoux (Vauclus).
- 24) Toth J., 1978. Contribution à l'étude de la fructification et de la régénération naturelle du cèdre de l'Atlas dans le sud de la France. Thèse Docteur - Ingénieur, Fac. Sci. St Jérôme, Marseille.
- 25) Tsouli AF. 2004. Contribution à l'élaboration des normes de qualité des plants forestiers : cas d
- 26) chêne-liège, du thuya et du pin maritime des Landes. Mém. 3^{ième} cycle, ENFI, Salé, 87 p.
- 27) Zaki A., 1968. Premières études sur le phénomène de dormance de la graine de cèdre et sur l'influence de différents facteurs à l'égard de la germination. SRF, Rabat.

2. Bioclimatologie - Dendrochronologie

- 28) Agoumi. A, Naji. A, Rahib. H, 1991: «changements climatiques: évolution régionale (Maroc)» Revue Marocaine de Génie Civil, numéro d'Avril 1995.
- 29) Aussenac. G. et Valette J.C. 1982: comportement hydrique estival de *Cedrus atlantica* Manetti, *Quercus ilex* L et *Quercus pubescens* Wild. Et de divers pins dans le Mont Ventoux. Ann. Sci. Forest., 39, 41-62.
- 30) Aussenac. G. et Finkelstein D. 1983: Influence de la sécheresse sur la croissance et la photosynthèse du Cèdre. Ann. Sci. Forest., 40, 67 – 77.
- 31) Bréda N. et Peiffer M. 1999 : Etude du bilan hydrique des chênaies de la forêt domaniale de la Harthe (Haut-Rhin) et impact des épisodes de sécheresse sur la croissance radiale des chênes. Rapport scientifique, INRA, 60 p.
- 32) Bréda N. 1998 : Analyse rétrospective de la croissance radiale des chênes de la forêt domaniale de La Harth (Haut Rhin). Rapport scientifique, INRA, 50 p.
- 33) Ducrey. M. 1981 : action des basses températures hivernales sur la photosynthèse du Cèdre et du Douglas. Ann. Sci. Forest., 38, 317-329.
- 34) Fritts H.C. 1976 : Tree ring and climate. Academic Press, London, 567 p.
- 35) Guiot J. 1981 : Analyse mathématique de données géophysique. Applications à la dendroclimatologie. Thèse Université Catholique de Louvain-La-Neuve. 170 p
- 36) IPCC 1995 : Rapport d'évaluation sur les changements climatiques, Vol I Août 1995.
- 37) Mhirit. O. 1982 : Etude écologique et forestière des cédraies du RIF marocain. Essai sur une approche multidimensionnelle de la phytoécologie et de la productivité du Cèdre (*Cedrus atlantica* Manetti). Thèse d'état, Université d'Aix Marseille.
- 38) Mokrim A. 1990 : Etude dendrochronologique du Pin d'Alep naturel en relation avec la variabilité pluviométrique au Maroc. 177 p.
- 39) Mokrim A., 2008. Etude bioclimatologique et dendrochronologique . Etude des causes de dépérissement de la cédraie du Moyen Atlas (SPEF, Ifrane). Convention FAO/UTF/MOR/028/MOR. Appui à la mise en œuvre du programme forestier national.
- 40) Najjar. G. 1982 : Méthode de catographie de l'évapotranspiration journalière en moyenne montagne tempérée. Thèse de 3^{ème} cycle, Université Louis Pasteur- Strasbourg
- 41) Saloui. A. 2000 : Variabilité pluviométrique et bilan hydrique dans les plaines et plateaux du Maroc Atlantique, Thèse de doctorat, faculté des lettres et sciences humain, Université Mohamed V, Rabat, Maroc.
- 42) Snoussi. S. 2000 : Variabilité climatique et ressources en eau : cas du bassin versant del'Ouergha. Thèse de doctorat, Université Hassan II – Ain Chock, faculté des Sciences Casablanca Maroc.
- 43) Stockton C. 1985: Current research progress toward understanding drought. Actes de la conférence internationale Agadir Maroc du 21 au 24 Novembre 1985.
- 44) Till. C. 1985 : Recherches dendrochronologiques sur le Cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica*) au Maroc. Thèse de doctorat, Faculté des sciences, Université de Louvain ; Belgique.

3. Ecophysiologie

- 45) Archaux F. et Wolters V. 2006. Impact of summer drought of forest biodiversity: What do we know? *Ann. For. Sci.* 63, pp : 645–652.
- 46) Aussenac G, Granier A. et Breda N. 1995. Effets des modifications de la structure du couvert forestier sur le bilan hydrique, l'état hydrique des arbres et la croissance. *Rev. For.Fra.* XLVII 1, pp : 54-62.
- 47) Aussenac G. 1992. Ecologie, écophysiologie et sylviculture. *Naturalia Monspeliensia, Série Botanique*, 67, pp: 3-77.
- 48) Aussenac G. 1993. Déficits hydriques et croissance des arbres forestiers. *Forêt Entreprise*, 89, pp: 40-47.
- 49) Aussenac G. 2000. Interactions between forests stands and microclimate: Ecophysiological aspects and consequences for silviculture. *Ann. For. Sci.*; 57, pp : 287-301.
- 50) Aussenac G. et Finkestein D. 1983. Influence de la sécheresse sur la croissance et la photosynthèse du Cèdre. *Ann. Sci. For.* 39, pp : 41-62.
- 51) Aussenac G. et Granier A. 1978. Quelques résultats de cinétique journalière de potentiel de sève chez les arbres forestiers. *Ann. Sci. For.* 35, pp : 19–32.
- 52) Aussenac G. et Valette J.C. 1982. Comportement hydrique estivale de *Cedrus atlantica* Manetti, *Quercus ilex* L. et *Quercus pubescens* Willd. et de divers pins dans le Mont Ventoux. *Ann. Sci. For.* 39, pp: 41-62.
- 53) Benabid A. 2000. Flore et écosystèmes du Maroc. Evaluation et préservation de la biodiversité. Editions Ibis Press Paris. 359p.
- 54) Bréda N. et Peiffer M. 1999. Etude du bilan hydrique des chênaies de la forêt domaniale de la Harthe (Haut-Rhin) et impact des épisodes de sécheresse sur la croissance radiale des chênes. Rapport scientifique, INRA, 60 p.
- 55) Bréda N., Granier A. et Dreyer E.. 2004. Physiologie des arbres : Les effets de la sécheresse et de la canicule. *Forêt de France* N° 474. PP : 23-24.
- 56) Bréda N., Huc R., Granier A. et Dreyer E. 2006. Temperate forest trees and stands under sever drought : a review of ecophysiological response, adaptation processes and long term consequences. Inra, EDP Sciences. *Ann. For. Sci.* 63, pp: 625-644.
- 57) Ducrey M. 1988. Réaction à la sécheresse de quelques essences forestières méditerranéennes. *Rev. For. Fra.* 40 (5), pp : 359-370.
- 58) ET-Tobi M. 2006. Approche multidimensionnelle des relations "Etat sanitaire- Station – Sylviculture" pour l'Etude du dépérissement des cédraies au moyen Atlas en vue d'élaborer un modèle sylvicole de prévention phytosanitaire. Thèse présentée à l'institut agronomique et vétérinaire Hassan 2. 174p + Annexes.
- 59) Gillian A., 2005. Problématique de dépérissement de la cédraie du moyen Atlas. Exposé présenté à l'Atelier de la commission du projet chargé de diagnostic des facteurs de dépérissement de la cédraie du moyen Atlas. DREF Moyen Atlas à Méknes.
- 60) Hinckley T. M., Lassoie J.P. et Running S.W. 1978. Temporal and spatial variation in the water status of forest trees. *Forest Science, Mono.* 20, pp : 1-72.
- 61) Kozlowski T.T, Kramer P.J. et Pallardy S.G. 1991. The physiological ecology of woody plants. Academic Press, New York, 811p.
- 62) Kozlowski T.T.1992. Carbohydrates sources and sinks in woody plants. *The Botanical review*, vol. 58, N°2: 107-222.
- 63) Newton R.J, Meir C.E., Van Buijtenen J. P. et Mckinley C. R. 1986. Moisture-stress management: silviculture and genetics. *Stress physiology and forest productivity Proceeding*, Texas agricultural experiment station, college station. 239 p.
- 64) Taoufik A. 2006. Essai d'analyse écophysiologique du dépérissement du *Cedrus atlantica* Manetti par l'étude des relations hydriques des jeunes plants du cèdre soumis à une sécheresse édaphique. Mémoire de 3ème cycle de l'ENFI, 137 p.
- 65) Teskey R.O., Bongarten B.C., Cregg B.M., Dougherty P.M. et Hennessey T.C. 1987. Physiology and genetics of tree growth response to moisture and temperature stress: an examination of the characteristics of loblolly pine (*Pinus taeda* L.). *Tree Physiol.* ; 3, pp: 41-61.

- 66) Zine El Abidine A. 2003. Le dépérissement des forêts au Maroc : analyse et stratégies de lutte. Sécheresse; 14(4), pp : 18-209s.
- 67) Zine El Abidine A. et Aboulabbess O. 2004. Dépérissement du cèdre du causse moyen Atlasique : Hypothèses plausibles et thèmes de recherche proposés. Atelier de restitution sur la problématique des dépérissements de la cédraie du moyen Atlas, jeudi 8 avril 2004. HCEFLCD.
- 68) Zine El Abidine A. 2006. Note Méthodologique relative aux termes de références TORC6. Etude des causes de dépérissement de la cédraie du Moyen Atlas (SPEF, Ifrane). Convention FAO/UTF/MOR/028/MOR, 23 p..
- 69) Zine El Abidine A., Taoufik A. et Lamhamedi M.S. 2007. Relations hydriques des jeunes plants de *Cedrus atlantica* M. soumis à une sécheresse édaphique (article en préparation).
- 70) Zine El Abidine A. 2008. Etude écophysiological du dépérissement du cèdre de l'Atlas. Etude des causes de dépérissement de la cédraie du Moyen Atlas (SPEF, Ifrane). Convention FAO/UTF/MOR/028/MOR. Appui à la mise en œuvre du programme forestier national.
- 71) Zine El Abidine A., Bernier P.Y. et Plamondon A.P. 1997. Ecophysiological de l'épinette noire (*Picea mariana*) en relation avec sa tolérance au stress hydrique. Ann. Rech. For. Au Maroc ; 30, pp : 145-166.
- 72) Zine El Abidine A., Bernier P.Y., Plamondon A.P. 1995. Diurnal and Seasonal variation in Gas Exchanges and water Relations of two lowland and two Upland Black Spruce ecotypes. Can. J.Bot. 73:716-722.

4. Science du sol et nutrition minérale

- 73) Beaudet G, 1969. Le Plateau Central marocain et ses bordures.
- 74) Bonneau M, 2002. Alimentation minérale du Cèdre de l'Atlas. Revue Forêt méditerranéenne. vol. 23, no1, pp. 3-10.
- 75) Chamayou H, 1978. L'eau et le sol
- 76) Chouraichi M, 1978. Mesure in situ de l'humidité du sol, utilisation de la méthode neutronique
- 77) Chouraichi A., 2008(a). Caractérisation du sol, nutrition du cèdre et suivi de l'humidité. Etude des causes de dépérissement de la cédraie du Moyen Atlas (SPEF, Ifrane).. Convention FAO/UTF/MOR/028/MOR. Appui à la mise en œuvre du programme forestier national
- 78) Chouraichi A., 2008(b). Etablissement des cartes de sensibilité du cèdre au dépérissement. Etude des causes de dépérissement de la cédraie du Moyen Atlas (SPEF, Ifrane).. Convention FAO/UTF/MOR/028/MOR. Appui à la mise en œuvre du programme forestier national
- 79) Legrand PH, 2003. Carence en bore de jeunes plantations de Cèdre de l'Atlas dans le Massif Central. Revue Forestière Française, vol. 55 N° 2, pp. 123-128
- 80) Lepoutre B, 1964 .Suite d'observations sur la régénération du cèdre par taches. Annales de la recherche forestière au Maroc. Tome7. Rapport: 1962 - 1963
- 81) Lepoutre B, 1966. Ecologie de la régénération naturelle du cèdre dans le Moyen Atlas marocain
- 82) M'hirit O, 1993. Le cèdre de l'Atlas, Annales de la recherche forestière au Maroc. Vol 22.

5. Entomologie

- 83) Benhalima (S.), 2004 . Les insectes xylophages et leur rôle dans le dépérissement du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Endl. Carrière) dans le Haut et Moyen Atlas (Maroc). Thèse d'Etat Es Sciences naturelles en biologie. Université Mohammed V – Agdal, Faculté des Sciences : 1- 107.
- 84) De Peyerimhoff (P.) , 1919. Notes sur la biologie de quelques Coléoptères phyttophages du Nordafricain (3ème série). Ann. Soc. Ent. France : 168-258.
- 85) Fairmaire, 1868. Ann. Soc. Ent. France : p 483.
- 86) Kocher L., (1956 – 1969). Catalogue commenté des Coléoptères du Maroc Travaux Institut Scientifique, Série Zoologie, 12 fascicules.

- 87) Mouna M., 1982. Recherches écologiques sur le peuplement frondicole des insectes du cèdre (*Cedrus atlantica* Man.) dans le Moyen Atlas marocain. Thèse Doct. de Spécialité, Fac. des Sciences St. Jérôme Marseille: 1-121.
- 88) Mouna M., 1988. La bioécologie et l'environnement biologique d'*Acleris undulana* Walsingham (Lep. Tortricidae, Tortricinae) ravageur du cèdre dans le Moyen Atlas marocain. Thèse d'Etat, Faculté des Sciences, Rabat : 1-140.
- 89) Mouna M. et Fabre J.-P., 2005. Pests insects of cedars: *Cedrus atlantica* Manetti, *C. libani* A.
- 90) Mouna M., 2008(d). Analyse et diagnostic entomologique du cèdre de l'Atlas. Etude des causes de dépérissement de la cédraie du Moyen Atlas (SPEF, Ifrane). Convention FAO/UTF/MOR/028/MOR. Appui à la mise en œuvre du programme forestier national
- 91) Richard and Henry, 1985. *C. brevifolia* in the Mediterranean area. In Entomological Research in Mediterranean Forest Ecosystems, INRA Editions, Science Update Series, INRA, Paris: 89-104.
- 92) RENECOFOR, 2005. Réseaux européens de suivi des dommages forestiers. Manuel (Notation des dommages forestiers). Département de la santé des forêts, Office National des Forêts, France (avril, 2005): 1-87.
- 93) Théry A., 1928. Etudes sur les buprestes de l'Afrique du Nord. Mémoires de la Société des Sciences Naturelles du Maroc : p 301 et 302.

6. Dendrométrie - Inventaire - Biométrie

- 94) Alder D., 1980 : Estimation des volumes et accroissements des peuplements forestiers. Vol.2, étude et prévision de la production. Etude FAO : Forêts n°22/2, Rome, 229 pages.
- 95) Anonyme, 1994 : Les dépérissements forestiers : Causes connues et inconnues. Numéro spécial. La revue forestière française. Rev.For.Fr.XLVI-5-1994. p.: 399-605, Ed. ENGREF, Nancy.
- 96) Aussenac G., et Guehl M., 1994 : dépérissement et accidents climatiques. Rev. For. Fr. XLVI. P : 458-469.
- 97) Bâaris M., 1994 : Relations sol régénération naturelle de la cédraie du Moyen Atlas. Cas des parcelles clôturées d'Ouiouane, Ajdir et Itzar. Mém. 3ième cycle, ENFI, Salé, 105 p.
- 98) Baccini A., Besse Ph., 1999 : Statistique descriptive multidimensionnelle. Publications du laboratoire de statistiques et de probabilités. UMR CNRS, Univ. Paul Sabatier, Toulouse III, 94 pages.
- 99) Bakhyi B., 2008. (a) Gestion antérieure de la forêt d'Azrou/ dépérissement. Etude des causes de dépérissement de la cédraie du Moyen Atlas (SPEF, Ifrane).Convention FAO/UTF/MOR/028/MOR. Appui à la mise en œuvre du programme forestier national.
- 100) Bakhyi B., 2008(b). Guides de sylviculture. Etude des causes de dépérissement de la cédraie du Moyen Atlas (SPEF, Ifrane). Convention FAO/UTF/MOR/028/MOR. Appui à la mise en œuvre du programme forestier national.
- 101) Barthod Ch., 1995 : Sylviculture et risques sanitaires dans les forêts tempérées (2ème partie). Rev.For. Fr.XLVII-1-1995; p:39-53.
- 102) Chessel, D., Lebreton J.D., et al., 1987 : Propriétés de l'analyse canonique des correspondances. Une illustration en hydrobiologie. Revue de statistique appliquée 35 (1987) 55-72
- 103) Ciesla, 1997 : Durabilité des forêts : rôle de la protection contre les incendies, les insectes et les maladies. In Ouvrages sur l'aménagement durable des forêts. Etude FAO-Forêts 122.p :147-168.
- 104) CRIA, 1978 : Description parcellaire de la forêt d'Azrou. 1978-1979. Direction des Eaux et Forêts et de la Conservation des sols. Centre Régional d'inventaire et d'aménagement de Meknès, Maroc.
- 105) CRIA, 1978 : Méthodologie et résultats d'inventaire de la forêt d'Azrou (1978-1979). Direction des Eaux et Forêts et de la Conservation des sols. Centre Régional des inventaires et des aménagements de Meknès, 54 pages, Maroc.
- 106) CRIA, 1978 : Procès-verbal d'aménagement de la forêt d'Azou. 1978-1979. Direction des Eaux et Forêts et de la Conservation des sols. Centre Régional des inventaires et des aménagements de Meknès, 84 pages, Maroc.
- 107) CRIA, 1983 : Etude d'aménagement. Forêt des Ait Youssi de L'amekla, Canton de Lalla Mimouna, Vol. VIII. Description parcellaire (1981-1984), 155 pages. Direction des Eaux et Forêts et de la Conservation des sols. Centre Régional d'inventaire et d'aménagement de Meknès, Maroc.

- 108) CRIA, 1983 : Projet d'aménagement de la forêt de Jbel Oua (Partie Sud), Forêt des Ait Youssi de L'amekla, Canton de Lalla Mimouna : Etude écologique et étude socio-économique et des parcours (1981-1983), Vol. II., 152 pages. Direction des Eaux et Forêts et de la Conservation des sols. Centre Régional des inventaires et des aménagements de Meknès, Maroc.
- 109) DREF-MA, 2004 : Etudes d'aménagement concerté des forêts et des parcours collectifs de la province d'Ifrane. Composante III : Etudes forestières. Etudes des forêts / Adaptation des aménagements, Forêt d'Ait Youssi Amekla – rapport principal n°10-3, avril 2004, n° 2 34 0055 1 r 10. Département des Eaux et Forêts (Maroc). Sogreah-Toba - avril 2004, 21 pages.
- 110) DREF-MA, 2004 : Etudes d'aménagement concerté des forêts et des parcours collectifs de la province d'Ifrane. Composante III : Etudes forestières. Etudes des forêts / Adaptation des aménagements, Forêt d'Azrou – rapport principal n°9-1, avril 2004, n° 2 34 0055 1 r 9. Département des Eaux et Forêts (Maroc). Sogreah-Toba - avril 2004, 121 pages.
- 111) Dubourdiou J., 1997 : Manuel d'aménagement forestier. Office National des forêts. Lavoisier Technique & Documentation, Paris, 244 pages.
- 112) Et-tobi M., Ezzahiri M. et Belghazi, B., 1998 : Apport des techniques d'analyse multivariée à l'évaluation de l'état de végétation des peuplements forestiers. Cas du chêne liège en Mamora (Maroc atlantique), Sécheresse 9 (3) (1998) 219-226.
- 113) Et-tobi M., Mhirit O., Mhamdi A., et Benziane M, 2001 : Réflexions et propositions pour l'élaboration d'un modèle sylvicole de protection phytosanitaire des Cédraies marocaines. IUFRO - Working Group « silvicultural problems in mountain forests » 1.05.14. Sylviculture of cedar (*Cedrus atlantica* Endl. M.) and Cork oak (*Quercus suber* L.). 22-26 October 2001, Rabat, Morocco. Edit. CIFOR-INIA, Madrid (Spain), p : 103-120.
- 114) Et-tobi M., Mhirit O., 2001 : Les arbres hors forêt : Le cas du Maroc. Cahier FAO-Conservation n°35 : Les arbres hors forêt, Vers une meilleure prise en compte. Edition CIRAD-FAO, Rome 2001. p : 179-186..
- 115) Et-tobi M., 2006 : Concepts, définition et prédictions des dépérissements forestiers. Chapitre de l'ouvrage « Le cèdre de l'Atlas. Mémoire du Temps ». Edition Mardaga, 2006 (ouvrage collectif international).
- 116) Et-tobi M., Mhamdi A., et Mhirit O., 2007 : A propos de quelques plans d'expériences en Blocs Incomplets : Principes, dispositifs et cas d'analyse statistique. Editions Zaouia, Rabat, 2007, 82 pages.
- 117) Et-tobi M., Ezzahiri M., Belghazi B., et Regragui A 1999 : Prédiction de la phytomasse aérienne des taillis de chêne vert du massif forestier d'El Ayat (Maroc oriental), Actes Inst. Agron. Vet. (Maroc) 1999 ; Vol.19(4) :211-217. Actes Editions (Rabat).
- 118) Et-tobi M., Belghazi B., Ezzahiri M., 1999 : Analyse de la diversité phyto-écologique de la tétraclinaie d'Ihchach (sud-ouest, Maroc). Ann.Rech.For.Rabat.Maroc.1999.T(32), p: 15 -20.
- 119) Et-tobi M, Belghazi B., Ezzahiri M., Aïd S., 2001 : Estimation de la biomasse du chêne vert dans le massif forestier d'Ait Hatem (Oulmès). Ann.Rech.For. Rabat. Maroc.2001.T(34), p:9-16.
- 120) Ettobi M. , 2008. Inventaire dendrométrique et phytosanitaire du cèdre de l'Atlas. Etude des causes de dépérissement de la cédraie du Moyen Atlas (SPEF, Ifrane). Convention FAO/UTF/MOR/028/MOR. Appui à la mise en œuvre du programme forestier national
- 121) HCEFLCD, 2006 : Description et analyse des conséquences du phénomène de dépérissement : Forêts de Ain Leuh, Senoual, Jbel Aoua Sud, Bekrit, Aghbalou Laarbi, Azrou. Etude du dépérissement du cèdre dans les forêts de la province d'Ifrane. Projet d'aménagement concerté des forêts et parcours collectifs de la province d'Ifrane. Haut Commissariat aux Eaux et Forêts et à la Lutte contre la Désertification, DREF-MA, Meknès - Rapport de consultation.
- 122) HCEFLCD, 2006 : Guide de sylviculture des cédraies dépérissantes: Forêts d'Azrou, Senoual, Bekrit, Jbel Aoua Sud et Aghbalou Laarbi. Etude du dépérissement du cèdre dans les forêts de la province d'Ifrane. Projet d'aménagement concerté des forêts et parcours collectifs de la province d'Ifrane. Haut Commissariat aux Eaux et Forêts et à la Lutte contre la Désertification, DREF-MA (Meknès) - Rapport de consultation.
- 123) HCEFLCD, 2006 : Stratégies et programmes d'intervention des cédraies dépérissantes : Forêts d'Azrou, Senoual, Bekrit, Jbel Aoua Sud et Aghbalou Laarbi. Etude du dépérissement du cèdre dans les forêts de la province d'Ifrane. Projet d'aménagement concerté des forêts et parcours collectifs de la province d'Ifrane. Haut Commissariat aux Eaux et Forêts et à la Lutte contre la Désertification, DREF-MA (Meknès) - Rapport de consultation.

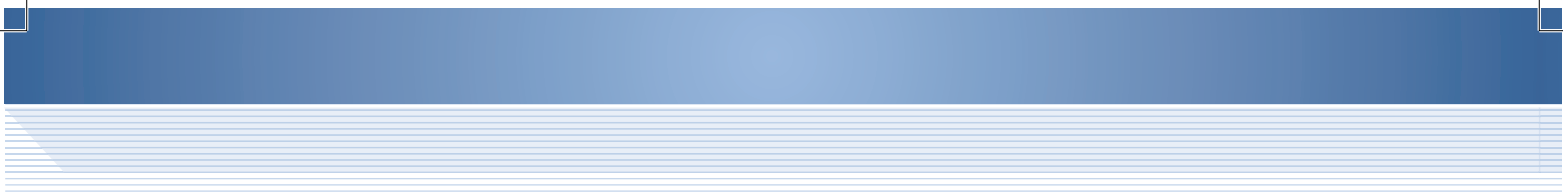
- 124) Ezzahiri M., Belghazi B. et Baaris M., 1999 : Etude de la régénération du cèdre de l'Atlas en fonction des propriétés physico-chimiques du sol des parcelles clôturées de Ouiouane, Ajdir et Itzer. Ann. Rech. For., Maroc, T 32, 44-53.
- 125) Ezzahiri M., Belghazi B., 2000 : Synthèse de quelques résultats sur la régénération naturelle du cèdre de l'Atlas (Maroc). Sécheresse, n° 2, vol. 11, 79-84.
- 126) Ezzahiri M., Belghazi B., Bahmad M., 1994 : Bilan de la régénération naturelle de la cédraie dans les parcelles clôturées du Moyen Atlas, Maroc. Ann. Rech. For., Maroc, 27 (spécial), Vol. 1, 259-268.
- 127) Gauquelin X. et al., 1995 : Guides de sylviculture. Forêts dépérissantes en plaine d'Alsace. ONF, Direction Régionale Alsace, France, 32 p.
- 128) Houston D.R., 1967: Dieback and decline of northeastern hardwoods. Trees, vol.28 -1967 : 12-14.
- 129) Jayaraman K., 1999 : Manuel de Statistique pour la Recherche Forestière. Organisation des Nations Unies pour L'alimentation et l'Agriculture, Coopération Hollandaise - Commission Européenne. FO: GCP/RAS/163/NET, FO: GCP/INT/679/EC, Rome.
- 130) Landmann G., 1994 : Concepts, définitions et caractéristiques générales des dépérissements forestiers. Rev.For.Fr.XLVI-5-1994; p:405-415.
- 131) Landmann G., 1991 : Les recherches en France sur le dépérissement des forêts. Programme DEFORPA : Dépérissement des forêts et pollution atmosphérique. 2ème rapport. 131 pages, ENGREF, Nancy.
- 132) Landmann G., 1998 : Comment apprécier la vitalité d'un arbre ou d'un peuplement forestier, Rev. For. Fr. XL (4) (1988) 265-284.
- 133) Lebreton J.D., Chessel D., Prodon R., and Yoccoz N., 1988a: L'analyse des relations espèces-milieu par l'analyse canonique des correspondances. I.- Variables quantitatives. Acta Œcologica 9 (1) (1988) 53-67.
- 134) Lebreton J.D., Richardot-Coulet M., Chessel D., and Yoccoz N., 1988b : L'analyse des relations espèces-milieu par l'analyse canonique des correspondances. II. -Variables de milieu qualitatives. Acta œcologica 9 (2) (1988) 137-151.
- 135) Lepoutre B., 1963 : Recherche sur les conditions édaphiques de régénération des cédraies marocaines. Ann. Rech. For. Maroc, T6.
- 136) Manion P.D., 1981 : Tree disease concepts. Englewood Cliffs (N.J): Prentice Hall. 324 p.
- 137) Manion P.D., 1989: Hardwood forest declines - concepts and management. Society of American Foresters National Convention "Healthy forests, healthy world", Rochester, NY, USA. 1988/10/16-19. Rochester : Society of American Foresters, 1989 : 127-130.
- 138) Manion P.D., and Lahance D., 1992: Forest decline concepts: an overview. In : Forest decline concepts, American Phytopathological Society - 1992 : 181-190.
- 139) Marion J., 1953 : La régénération naturelle dans les cédraies du rebord septentrional du Moyen Atlas occidental calcaire. Ann. Rech. For. Maroc, T1, 47-146.
- 140) Mhamdi A., 1991 : Analyse multivarié et échantillonnage linéaire de la végétation : Une étude synécologique de quelques types de végétation steppique au Maroc. Doctorat ès Sciences Agronomiques, Institut Agronomique et vétérinaire Hassan II, Rabat. 150 pages.
- 141) Mhamdi A. et Rouchdi, M., 2008. Essai sur une approche d'analyse multidimensionnelle des données relatives au dépérissement du cèdre de l'Atlas. Etude des causes de dépérissement de la cédraie du Moyen Atlas (SPEF, Ifrane). Convention FAO/UTF/MOR/028/MOR. Appui à la mise en œuvre du programme forestier national
- 142) Mhirit O., 1994(a) : Croissance et productivité du cèdre de l'Atlas: Approche multidimensionnelle de l'étude des liaisons stations - productions. Ann. Rech. For. Maroc, n°27 spécial, vol.1., I-XXXVI & 1-361.p:296-312.
- 143) Mhirit O., 2006(b). Méthodologique globale de l'étude .Etude des causes de dépérissement de la cédraie du Moyen Atlas (SPEF, Ifrane). Convention FAO/UTF/MOR/028/MOR. Appui à la mise en œuvre du programme forestier national. 45p.
- 144) Mhirit O., 2008(c). Rapport de synthèse des études thématiques. Etude des causes de dépérissement de la cédraie du Moyen Atlas (SPEF, Ifrane). Convention FAO/UTF/MOR/028/MOR. Appui à la mise en œuvre du programme forestier national.
- 145) Mueller-Dombois D., 1988 : Forest decline and dieback - a global perspective. Trends in Ecology and Evolution, vol. 3-1988: 310-312.

- 146) Mueller-Dombois D., 1992: A natural dieback theory. Cohort senescence as an alternative to the decline disease theory. In : Forest decline concepts, American Phytopathological Society-1992 : 26-37.
- 147) Pardé J., et Bouchon J., 1988 : Dendrométrie. 2ème Edition. Ecole Nationale du Génie Rural et des Eaux et Forêts, Nancy, 328 pages.
- 148) Pujos A., 1966 : Les milieux de la cédraie marocaine. Etude d'une classification des cédraies du Moyen Atlas et de la régénération actuelle dans les peuplements. Ann. Rech. For. Maroc, T8, 238 p.
- 149) René L.A, et Singh P., 1997 : Gestion de la santé des forêts. Actes du XIème Congrès Forestier Mondial, Antalya, Vol.5, p :147-157.
- 150) RMRS-USDA, 1998: Toward a unified framework for inventorying and monitoring forest ecosystem resources. North American science symposium. Rocky Mountain Research Station (RMRS, USDA), 533 pages; Guadalajara, Jalisco, Mexico, November 1-6,1998.
- 151) RNC, 1999 : La santé des forêts : Contexte du Programme scientifique du Service canadien des forêts. Direction des sciences, Service canadien des forêts, Ressources naturelles du Canada (RNC); Ottawa, 1999. 12 pages.
- 152) Rondeux J., 1999 : La mesure des arbres et des peuplements forestiers. Les presses agronomiques de Gembloux. 522 pages, Gembloux.
- 153) Sâafadi M., 2004 : Contribution à l'évaluation des reboisements de cèdre dans le Moyen Atlas central. Mém. 3ème cycle, ENFI, 59 p.

Table des matières

PREFACE	1
PREAMBULE	3
1. Contexte général de l'étude	5
1.1. Le dépérissement du cèdre dans le Moyen Atlas: un problème préoccupant	5
1.2. Concept et objectifs de l'étude : une approche globale pluridisciplinaire	5
1.3. Zone d'étude: la forêt d'Azrou, échantillon représentatif de la cédraie du Moyen Atlas	7
2. Méthodologie globale de l'étude	10
2.1. Choix d'un protocole d'échantillonnage	10
2.2. Justification du protocole d'échantillonnage retenu	13
2.3 Champs disciplinaires et types d'investigations	14
2.4. Utilisation formelle d'outils d'analyse et de spatialisation du dépérissement	15
2.5. Importance des moyens mobilisés	16
3. Analyses thématiques : Décrire pour mieux comprendre, résultats et acquis	16
3.1. Analyse bioclimatologique et dendrochronologique	16
3.2. Analyse écophysiological	21
3.3. Caractérisation du sol, nutrition du cèdre et suivi de l'humidité	28
3.4. Analyse et diagnostic entomologiques	35
3.5. Inventaire dendrométrique et phytosanitaire	43
3.6. Analyse de la gestion antérieure des forêts	50
4. Les synthèses: Etude des relations «santé des peuplements - station - sylviculture - symptômes et dommages phytosanitaires»	55
4.1. Gestion et organisation de la base des données	55
4.2. Typologie et identification des classes de santé du cèdre	59
4.3. Typologie des stations écologiques: incidence écologique sur le dépérissement et la mortalité du cèdre	61
4.4. Typologie des peuplements forestiers	63
4.5. Typologie des symptômes et dommages phytosanitaires	64
4.6. Evaluation des apports explicatifs des variables écologiques sur dépérissement	66
4.7. Essai de synthèse et d'interprétation des relations fonctionnelles entre le dépérissement du cèdre et les conditions du milieu	71
5. Essai de construction d'outils d'aide à la décision pour la gestion de la Cédraie d'Azrou	73
5.1. Elaboration d'un indice de sensibilité du cèdre au dépérissement	73
5.2. Essai de prédiction des mortalités et des dépérissements du cèdre	77
6. Programme d'action: Principes de base, conception et contenu	83
6.1. Cadre phytogéographique de la gestion des cédraies étudiées	83
6.2. Structure et consistance de l'aménagement en vigueur	84
6.3. Causes du dépérissement : nécessité d'une opération d'urgence	86
6.4. Guide de sylviculture : concept et contenu	89

7. Guides de sylviculture de la forêt d'Azrou	93
7.1. Guide 1 : Série de protection intégrale	93
7.2. Guide 2 : Série « Futaie régulière sur basalte »	93
7.3. Guide 3 : Série « Futaie régulière sur calcaire »	97
8. Guides de sylviculture de la forêt d'Ait Youssi	102
8.1. Caractéristiques de la forêt	102
8.2. Guide 4 : Série « Futaie régulière sur calcaire »	102
8.3. Guide 5 : Série Futaie jardinée sur calcaire	105
Conclusions et recommandations	107
Remerciements	113
Documents consultés	114

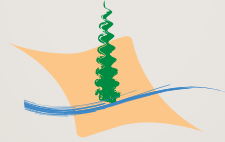


Etude des Causes du Dépérissement de la Cédraie du Moyen-Atlas

Haut Commissariat aux Eaux et Forêts et à la Lutte Contre la Désertification

2017

Royaume du Maroc



**Haut Commissariat aux Eaux et Forêts
et à la Lutte Contre la Désertification**

Quartier Administratif, Chellah Rabat
eauxetforets.gov.ma