ROYAUME DU MAROC
Minsistère de l'Agriculture et
de la Mise en Valeur Agricole
Direction des Eaux et Forêts
et de la Conservation des Sols

المملكة المغربية
وزارة الفلاحة والاستثمار الفلاحي
إدارة المياه والغابات والمحافظة على التربة

حوليات البحث الغابوي في المغرب

ANNALES DE LA RECHERCHE FORESTIERE AU MAROC

Ann. Rech. For. Maroc, 27 (spécial), vol.2 - 362 - 733 1994 ISSN 0483-8009

LE CEDRE DE L'ATLAS

Cedrus atlantica (Manetti)

édité par
O. M'HIRIT, A. SAMIH, M. MALAGNOUX

SILVA MEDITERRANEA

Actes du Séminaire International sur le Cèdre de l'Atlas
Ifrane (Maroc), 7 - 11 Juin 1993

CIHEAM FAO IUFRO

ROYAUME DU MAROC
Minsistère de l'Agriculture et
de la-Mise en Valeur Agricole
Direction des Eaux et Forêts
et de la Conservation des Sols

المملكة المغربية
وزارة الفلاحة والاستثمار الفلاحي
إدارة المياه والغابات والمحافظة على التربة

حوليات البحث الغابوي في المغرب

ANNALES DE LA RECHERCHE FORESTIERE AU MAROC

Ann. Rech. For. Maroc, 27 (spécial), vol.2 - 362 - 733 1994 ISSN 0483-8009

LE CEDRE DE L'ATLAS

Cedrus atlantica (Manetti)

édité par

0. M'HIRIT, A. SAMIH, M. MALAGNOUX

SILVA MEDITERRANEA

Actes du Séminaire International sur le Cèdre de l'Atlas
Ifrane (Maroc), 7 -11 Juin 1993

CIHEAM FAO IUFRO

ISBN 9981-824-00-3

ISBN 9981-824-03-8

Dépôt légal : N° 1985/291

Edition 1994

المحور الثاني:

علم التحريج والإستثمار الغابوي

(تتمة)

THEME N°2:

SYLVICULTURE ET AMENAGEMENT

(SUITE)

Ann. Rech. For. Maroc, (1994), T(27), 363-379

ملاحظات أولية حول هندسة
أرز الأطلس (سدرس أطلنتيكا مانيتي)

سيلفي صاباتي و دانيال بارثلمي
وحدة تنميط النباتات

يسمح لنا التحليل الهندسي لأشجار أرز الأطلس (سدرس أطلنتيكا مانيتي) بفهم التسلسل الدقيق للأحداث التي تنطبع عليها طيلة مدة حياتها. وقد سجلت الملاحظات الشكلانية على الأشجار التي تتطور في مزارع جبل ڤنتو في مراحل نموهاالأولى، يكون للشجر ساق مستقيم البنيرة و حلقية متغيرة وبنمو ايقاعي غير محدد. أما الجذع فيتفرع منذ الفصل الأول للتنبت. ويكون التفرع ايقاعيا. تبدأ الشجرة الصغيرة في إظهار وحدتها الهندسية تدريجيا. وتتألف تلك الوحدة من أربعة أصناف خطوط عريضة هي: الجذع، الفرع القصير، الفرع الطويل والغصن. ويتوفر كل صنف من الخطوط العريضة على مميزات شكلانية خاصة تتوزع حسب نظام محدد على النبت السنوي للجذع.

PREMIERES OBSERVATIONS SUR L'ARCHITECTURE DU CEDRE DE L'ATLAS, *CEDRUS ATLANTICA* (ENDL.) MANETTIEX CARRIERE, (PINACEAE).

SABATIER S. et BARTHELEMY D.

Unité de Modélisation des Plantes C.I.R.A.D./G.E.R.D.A.T., BP 5035, 34032 Montpellier, France.

Résumé - *L'analyse architecturale du Cèdre de l'Atlas, Cedrus atlantica (Endl.) Manetti ex Carrière, a permis de révéler sa séquence de développement de sa germination à son âge adulte. Le cèdre possède un tronc monopodial orthotrope à croissance et ramification rythmique. Après avoir exprimé son unité architecturale composée de cinq catégories d'axes (tronc, branche, rameau long, ramille et rameau court), l'arbre forme sa cime grâce à un processus de duplication partielle de son architecture élémentaire au sein des branches maîtresses. Les processus de régénération du tronc provoqués par des événements perturbant son développement sont discutés.*

***Cedrus atlantica* / architecture / germination / croissance / duplication.**

Summary - The architectural analysis of *Cedrus atlantica* (Endl.) Manetti ex Carrière has revealed its developmental sequence from germination to the adult stage. The Cedar tree has an orthotropic monopodial trunk with rythmic growth and branching. It conforms itself to an architectural unit composed of five categories of axes with specific morphological features: trunk, branch, long shoot, twig and short shoot. During the development of the tree, the branches expand by a process of duplication of their elementary architecture. The processes of trunk regeneration which are released by disruptive events are discussed.

***Cedrus atlantica* / architecture / germination / growth / duplication.**

INTRODUCTION

Le cèdre de l'Atlas, *Cedrus atlantica* (Endl.) Manetti ex Carrière est une Pinaceae appartenant à la sous-famille des Laricoïdeae Melchior et Wedermann (Krussman, 1983 in Farjon, 1990). Son aire naturelle s'étend du Maroc (Rif, Moyen Atlas et Grand Atlas Oriental) à l'Algérie (Djurdjura, Monts Hodna et Aurès, Atlas de Blida et massif de l'Ouarsis) (Emberger, 1938).

En forêt méditérranéenne française, l'introduction du cèdre de l'Atlas date de 1862. Les premières graines semées provenaient des montagnes algériennes puis, plus tard, des monts marocains (Parde, 1976). Très vite, l'acclimatation du Cèdre de l'Atlas dans la zone bioclimatique de la "chênaie pubescente chaude" s'avère être une réussite (Parde, 1976). Cette essence a suscité l'intérêt des forestiers pour son excellente qualité de bois d'oeuvre, pour son aptitude à protéger le sol et par sa beauté (Toth, 1970-1972).

Que les peuplements soient issus de régénérations naturelles ou de plantations artificielles, l'optimisation des traitements sylvicoles demande une bonne connaissance du développement de l'essence étudiée. Pour comprendre la dynamique de développement du Cèdre de l'Atlas dans la France méridionale, l'Unité de Modélisation des Plantes du C.I.R.A.D./G.E.R.D.A.T. (Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement/ Gestion, Recherche, Documentation et Appui Technique) a entrepris une étude de la modélisation de la croissance et de la ramification de cette espèce en collaboration avec l'Unité "Croissance, Production et Ecophysiologique des Arbres et des Peuplements Forestiers" du Laboratoire des Recherches Forestières Méditérranéennes de l'I.N.R.A (Institut National de Recherche

Agronomique) d'Avignon dans le cadre d'une A.I.P. (Action d'Intervention sur Programme)-I.N.R.A. "Architecture".

Dans ce cadre, une connaissance préalable de l'architecture du cèdre s'imposait. Bien que cette étude ne soit pas achevée, les premiers résultats ont permis de caractériser les premières phases du développement de l'arbre et de révéler les mécanismes de régénération provoqués par des événements affectant le fonctionnement du tronc.

MATERIEL ET METHODE

Réalisée dans le Sud de la France, cette étude a porté sur des individus issus de régénération naturelle et sur des individus vivant en plantation artificielle. Les observations morphologiques ont été faites dans des stations forestières présentant des conditions de fertilité variées:

- la forêt de Rialsesse, dans l'Aude, se situe à une altitude de 450 m et s'étend sur un massif cristallin: elle présente une fertilité excellente pour le cèdre (Toth, 1978);
- la forêt de Bedoin, sur le versant Sud du Mont Ventoux, se localise à une altitude de 800 m, où les Cèdres poussent sur des calcaires fissurés filtrants;
- la forêt de Sault, sur le versant Sud-Est du Mont Ventoux, est située à une altitude de 1000 m. Ces deux dernières stations présentent une bonne fertilité pour le cèdre.

Conformément à la méthode d'analyse architecturale (Halle et *al.,* 1987; Barthelemy, 1988) intégrant les concepts d'architecture (Halle et *al.,* 1970; Halle et *al.,* 1978; Barthelemy et *al.,* 1989), cette étude a été réalisée en observant des individus dans leur globalité à divers stades de développement et dans des milieux variés. La structure de chaque individu est décrite complètement et schématisée.

La comparaison des différentes architectures permet de déterminer l'unité architecturale de l'espèce (Barthelemy et *al.,* 1989) définie pour la première fois sous le terme de "diagramme architectural" par Edelin (1977). Cette approche permet de comprendre la dynamique de croissance et la stratégie de réitération ; Oldeman, 1974; Edelin, 1986; Barthelemy et *al.,* 1991) de l'espèce. En pratique, "pour chaque stade, plusieurs individus sont observés et dessinés. Par comparaison et recoupements, le schéma architectural réalise alors la synthèse des observations" (Barthelemy, 1988). Les arbres sont observés sur pied ou après abattage. L'observation de grands arbres sur pied demande l'utilisation de jumelles (Trinovid Leitz 10x40).

LE DEVELOPPEMENT ARCHITECTURAL DU CEDRE

La plante d'un an

Au printemps, la graine s'ouvre libérant une plantule formée d'un hypocotyle portant une rosette d'une dizaine de cotylédons qui entourent un méristème en activité d'allongement: à leur aiselle, un bourgeon cotylédonaire peut exister. Au cours de la saison de végétation, l'axe épicotylé vertical s'allonge. Il porte des feuilles aciculées alternes disposées en spirales (le nombre de spires foliaires varie de 3 à 9 selon les individus) qui pourront persister deux à trois ans. La longueur de ces aiguilles et des entre-noeuds qui leur sont associés varie le long de la tige. Cette dernière porte à sa base de longues aiguilles séparées par des entre-noeuds courts, en son milieu des aiguilles séparées par des entre-noeuds longs et à son sommet de petites aiguilles qui protégent le bourgeon apical, séparées par des entre-noeuds courts.

En fin de saison de végétation, dans le bourgeon, les ébauches foliaires de la future pousse printanière entourent le dôme méristématique. Lors de l'arrêt de croissance hivernal, le bourgeon présente une serie de cataphylles extérieures carénées entourant des cataphylles rondes translucides qui protègent un axe minuscule portant des ébauches foliaires et terminé par le méristème apical.

Selon l'environnement, la structure de la jeune plante va être modifiée. En régénération naturelle, l'allongement de la tige n'est que de quelques centimètres et certaines feuilles axillent de petits bourgeons ronds qui donneront des rameaux courts l'année suivante (Planche I, Figure 1).

En pépinière, l'allongement de la tige peut atteindre une vingtaine de centimètres. Dès la première année, la plantule émet des rameaux plagiotropes dont le développement est simultané avec celui de la tige porteuse (rameaux sylleptiques). Les plus vigoureux de ces rameaux naissent préférentiellement dans la partie proximale de la tige. Sur ces rameaux, certaines aiguilles peuvent axiller des rameaux courts à développement immédiat qui sont réduits à une rosette d'aiguilles courtes entourant un bourgeon, et disposés tout autour de leur axe porteur. En fin de saison de végétation, deux à quatre gros bourgeons ovales disposés sur différentes hélices foliaires sont présents près du sommet de l'axe épicotylé et donneront, au printemps suivant, un pseudo-verticille de rameaux dominants (Voir Planche I, Figure 2).

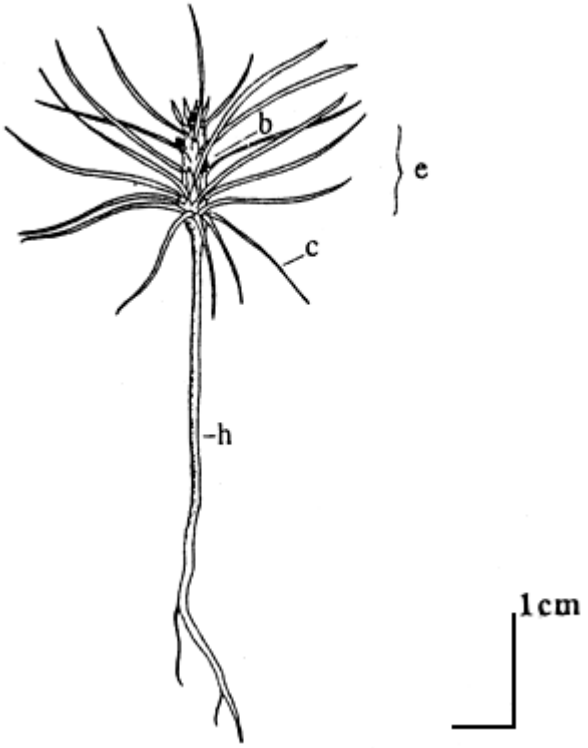

Fig. 1

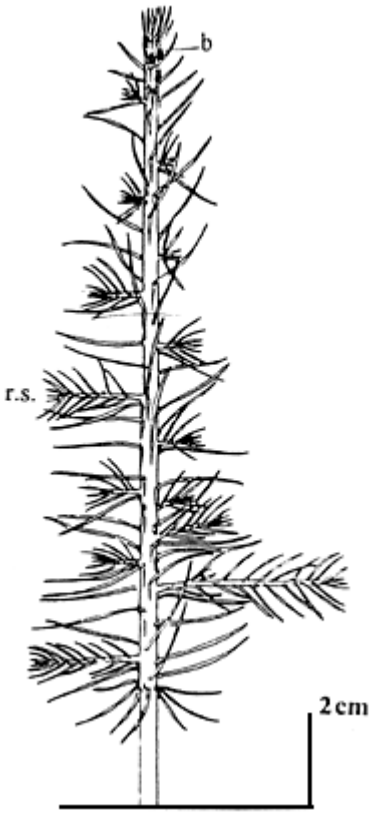

Fig. 2

Planche I: Plante d'un an.
Figure 1: Plante issue de régénération naturelle. c: cotyledon; h: hypocotyle; e: épicotyle; b: bourgeon axillaire. **Figure 2: Plante issue de pépinière.** r.s. : rameau sylleptique.

Le jeune arbre: la mise en place de l'unité architecturale

Tous les axes du cèdre ont une croissance rythmique et sont constitués d'une succession d'unités de croissance qui, dans ce travail, seront assimilées aux pousses annuelles. Chaque pousse annuelle est limitée par deux zones de cataphylles très rapprochées qui correspondent aux écailles protégeant le méristème dans le bourgeon hivernal (Planche II, figures 2 et 3). Sur les parties plus âgées de l'axe, ces limites sont marquées par les cicatrices très rapprochées de ces cataphylles. Au printemps, les pousses annuelles naissantes du tronc et des branches sont souvent inclinées et se redresseront, normalement, en fin de saison de végétation ou au cours du printemps suivant.

En régénération naturelle, les premières pousses annuelles du tronc sont de petite taille et se caractérisent par une ramification à développement différé d'un an (ramification proleptique). L'année de leur formation, elles portent de petits bourgeons latéraux qui évolueront en rameaux courts et des bourgeons sub-apicaux qui génèrent de frêles rameaux. Les années suivantes, les pousses annuelles successivement émises par le tronc sont de plus en plus grandes et présentent un nombre de noeuds et une longueur moyenne d'entre-noeuds croissants. Chacune de ces pousses annuelles porte alors en position subapicale des rameaux dont les pousses annuelles successives présentent dans leur partie proximale des rameaux courts et dans leur partie distale de petits rameaux eux-mêmes ramifiés. Tous ces axes montrent un développement différé d'un an. Sur l'arbre plus âgé, les pousses annuelles nouvellement formées par le tronc sont plus vigoureuses et présentent dans leur partie médiane des rameaux à développement immédiat (ramification sylleptique). L'unité de croissance porte alors de sa partie proximale à sa partie distale (Planche II, Figure 1):

- des rameaux courts à développement immédiat composés d'un axe court portant une rosette de petites aiguilles et terminé par un bourgeon apical dont le méristème donnera naissance à des rameaux courts qui s'élagueront rapidement;
- des rameaux à développement immédiat portant des bourgeons axillaires et parfois, dans leur partie proximale, des rameaux courts à petites aiguilles. Les méristèmes de ces pousses sylleptiques édifieront de longs rameaux dont le port est plus ou moins retombant;
- des bourgeons axillaires dont les méristèmes donneront des rameaux dominants à développement différé d'un an.

Les rameaux sylleptiques proviennent du développement immédiat de leur méristème édificateur. Ce mode de développement entraîne la formation de rameaux ayant des caractéristiques morphologiques spécifiques: ils ne présentent pas de cataphylles basales et portent de petites aiguilles séparées par des entre-noeuds plus petits que ceux de l'unité de croissance porteuse.

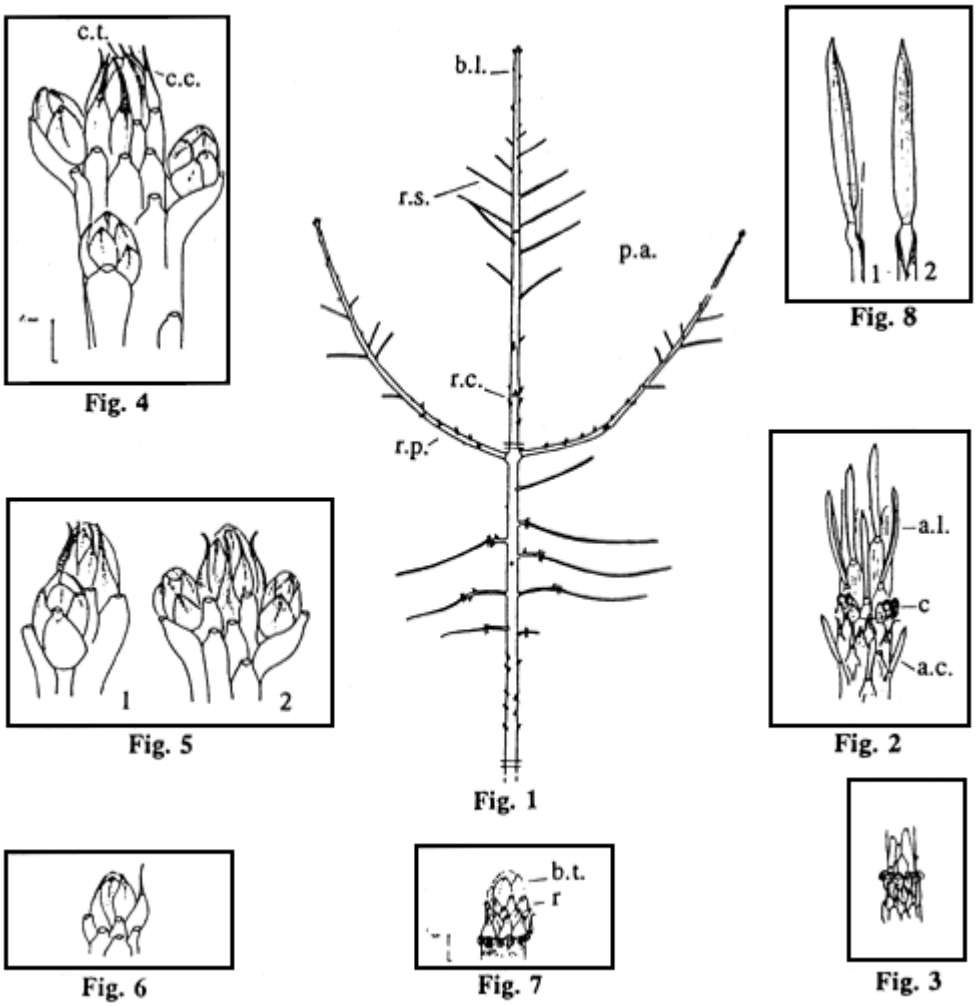

Planche II: La pousse annuelle.
Figure 1: Deux pousses annuelles successives du tronc. p.a.: pousse annuelle; r.p.: rameau proleptique; r.c.: rameau sylleptique; r.c: rameau court; b.1.: bourgeon latéral; ( ): arrêt de croissance interannuel. **Figure 2: Arrêt de croissance entre deux pousses annuelles successives du tronc.** a.c: aiguille courte; a.1.: aiguille longue; c: cataphylle. **Figure 3: Arrêt de croissance entre deux pousses successives d'un rameau long. Figure 4: Bourgeons hivernaux à l'extrémité du tronc.** cc: cataphylle carénée; c.t.: cataphylle ronde translucide. **Figure 5: Bourgeons hivernaux à l'extrémité d'une branche.** 1: vue de profil; 2: vue de face. **Figure 6: Bourgeon apical hivernal d'un rameau court Figure 7: Rameau court.** r: rosette d'aiguilles (aiguilles coupées); b.t.: bourgeon terminal. **Figure 8: Aiguille longue.** 1 : vue de profil; 2: vue de dos.

Le tronc poursuit sa croissance en élaborant des pousses annuelles de plus en plus vigoureuses et, sur chacune d'elles, les branches, réparties très régulièrement, expriment pleinement leur ramification. L'arbre montre alors un port nettement pyramidal. L'organisation précise qui s'est établie au sein du jeune arbre, détermine la différenciation de plusieurs catégories de rameaux identifiables par des caractères morphologiques spécifiques. A ce stade, le jeune arbre a exprimé son architecture

élémentaire spécifique, c'est-à-dire son unité architecturale (Barthelemy et *al.,* 1989), qui se caractérise, chez le Cèdre de l'Atlas, par cinq catégories d'axes végétatifs: le tronc, la branche, le rameau long, la ramille et le rameau court (Planche III).

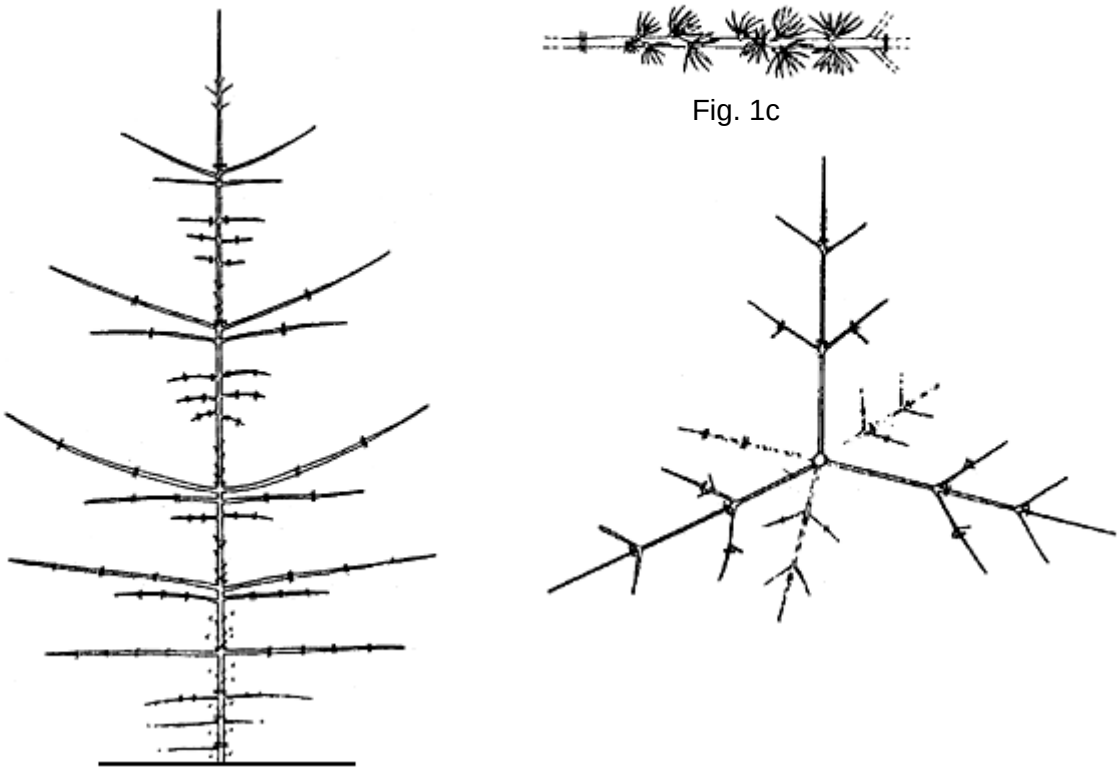

Fig. 1c

Fig. 1a

Fig. 1b

Planche III: L'unité architecturale du Cèdre.
Figure 1: Architecture de *Cedrus altantica.* Figure la: Schéma architectural (vue en élévation). ( ) arrêt de croissance interannuel. **Figure lb: Pseudo- verticilles de branches positionnés au sommet d'une pousse annuelle du tronc** (vue par dessus). **Figure 1c: Répartition des rameaux courts sur une pousse annuelle d'une branche.**

Le tronc monopodial orthotrope présente une symétrie axiale. Sur chacune de ses pousses annuelles, la ramification se compose de pseudo-verticilles de branches à développement différé d'un an dans la partie sub-apicale, de rameaux longs à développement immédiat dans la partie médiane et de rameaux courts à développement immédiat dans la partie basale.

Tableau 1: Caractéristiques des différentes catégories d'axe composant l'unité architecturale.

Tronc	Branche	Rameau long	Ramifie	Rameau court
croissance indéfinie	croissance indéfinie	croissance définie à long terme	croissance définie à moyen terme	croissance définie à moyen terme
croissance rythmique	croissance rythmique	croissance rythmique	croissance rythmique	croissance rythmique
direction de	direction de *ou* horizontale	direction de croissance horizontale	sans direction de croissance précise	sans direction de
ramification rythmique	ramification rythmique	ramification rythmique	ramification rythmique	
porte des pseudo verticilles de 2 à 4 branches, des rameaux longs et des rameaux courts	porte des pseudo-verticilles de 2 à 3 rameaux longs, des ramilles et des rameaux courts	porte des pseudo-verticilles de 1 à 2 ramilles et des rameaux courts	ne porte que des rameaux courts	peut porter 1 rameau court
rameaux longs sylleptiques et sylleptiques fréquents	rameaux longs sylleptiques peu fréquents et rameau courts sylleptiques fréquents	rameau court sylleptique rare	pas de rameau sylleptique	pas de rameau sylleptique
phyllotaxie alterne spiralée	phyllotaxie alterne spiralée	phyllotaxie alterne spiralée	phyllotaxie alterne spiralée	phyllotaxie alterne spiralée

La branche a une direction de croissance horizontale ou oblique et une symétrie bilatérale. Elle présente sur chacune de ses pousses annuelles en position sub-apicale des pseudo-verticilles de rameaux longs à développement différé, en position médiane des ramilles à développement immédiat et en position basale des rameaux courts à développement immédiat.

Le rameau long a une direction de croissance horizontale et une symétrie bilatérale. Il tend à adopter un port retombant au cours de son développement. Chacune de ses unités de croissance porte une ou deux ramilles à développement différé en position sub-apicale et des rameaux courts à développement différé dans la partie médiane et basale de la pousse. Les rameaux longs peuvent naître sur la branche ou sur le tronc.

La ramille n'a pas de direction de croissance précise. Ce frêle rameau porte quelques rameaux courts à développement différé répartis suivant une symétrie bilatérale. La ramille a un devenir limité et son méristème émet rapidement des unités de croissance courtes comparables à celles qui constituent les rameaux courts. La ramille peut être portée par le rameau long, la branche ou le tronc.

Le rameau court n'a pas de direction de croissance précise. Il est composé d'une succession d'unités de croissance très courtes. Chacune d'elles présente un axe

minuscule portant une rosette de longues aiguilles et terminé par un bourgeon apical. Le rameau court peut éventuellement se ramifier et porter un autre rameau court. Le rameau court est porté par toutes les catégories d'axe.

Le tronc et les branches constituent la charpente de l'arbre, tandis que les rameaux longs, les ramilles et les rameaux courts ont d'avantage un rôle d'exploiter le milieu.

La séquence de différenciation décrite ci-dessus correspond à des Cèdres poussant dans des conditions "normales" de développement. L'analyse d'individus poussant dans des conditions variées montre néanmoins que l'expression de la séquence architecturale de cette espèce peut être modulée par le milieu qui va masquer ou accentuer certains traits de la morphogénèse.

Dans un environnement peu propice à la croissance, la taille des individus et leur degré de ramification tendent à diminuer. Ces modifications s'accompagnent d'un appauvrissement de la structure des différentes catégories d'axes. Dans des conditions optimales de croissance, au contraire, chaque catégorie d'axes s'exprime pleinement et l'augmentation de vigueur des pousses se traduit par le développement d'un grand nombre de rameaux sylleptiques.

L'environnement peut également affecter le mode de croissance des pousses annuelles. Chez le Cèdre de l'Atlas, des marqueurs morphologiques d'arrêt de croissance intra-annuel ne sont généralement pas observés et le développement de la pousse annuelle semble continue. Dans certains cas, néanmoins, deux vagues de croissance peuvent être individualisée et sont alors matérialisées par une série de feuilles avortées plus ou moins rapprochées les unes des autres qui indiquent un temps d'arrêt ou de ralentissement dans l'allongement de la pousse annuelle. Ces phénomènes de polycyclisme sont généralement rares et semblent ne s'exprimer que dans certaines conditions, notamment sur des individus peu vigoureux dont la croissance peut être favorisée par une saison de végétation favorable.

Après avoir exprimé son unité architecturale, le Cèdre poursuit sa croissance et parallèlement sa cime prend de l'ampleur grâce au processus de duplication de son unité architecturale. Ce phénomène va caractériser une nouvelle phase de développement.

L'arbre adulte: l'étalement des branches

L'arbre adulte présente une cime constituée d'étages de branches de plus en plus ramifiées de son sommet vers sa base.

Dans sa partie haute, l'arbre s'édifie conformément à son unité architecturale. Les branches présentent un axe édificateur dominant autour duquel se hiérarchisent toutes les autres catégories d'axes comme cela a été décrit précédemment.

Dans la partie basse et médiane de l'arbre, les branches plus âgées ont tendance à être plus volumineuses, plus ramifiées et à acquérir une structure plus complexe due à un nouvel événement morphologique. En effet, à l'extrémité de la branche, un des bourgeons sub-apicaux de l'unité de croissance paraît plus volumineux et plus proche de l'apex. Lors de son débourrement, son méristème donne naissance à un rameau dont la pousse annuelle possède un diamètre, une longueur et un degré de ramification très proches de ceux de la pousse annuelle de la branche et qui présente un angle d'insertion plus resserré que celui des autres rameaux longs de la pousse porteuse. Son développement va concurrencer celui de l'axe édificateur. Ce phénomène

aboutit fréquemment à la formation d'une fourche au sein de la branche. Au cours des phases ultérieures, une véritable dédifférenciation de ce rameau est observée et, par un phénomène de réitération partielle, aboutit finalement à la formation d'une petite branche portée par la grande.

Que la branche soit oblique ou horizontale, le processus est identique. Seule la position dans l'espace des rameaux dupliqués change: elle est basse ou latérale-basse dans le cas d'une branche oblique et latérale dans le cas d'une branche horizontale.

Au fil du temps, ce phénomène de réitération partielle envahit peu à peu les branches et permet leur étalement (Planche IV, Figure 2 et 3). Ce processus de duplication partielle de l'unité architecturale s'inscrit dans le développement normal de la branche: on parlera alors de "réitération partielle adaptative". Il peut parfois être favorisé par la mort du méristème apical de la branche et, dans ce cas, il s'agira d'une "réitération partielle traumatique". Ce processus de réitération partielle de l'architecture est fréquent chez de nombreux Conifères (Edelin, 1977).

C'est en général à ce stade que la sexualité commence à s'exprimer. Chez le Cèdre, les cônes mâles et femelles sont séparés et apparaissent toujours en position terminale sur certains rameaux courts. La floraison d'un rameau court apparaît dès qu'il a formé un nombre minimum d'unités de croissance végétatives. En général. quatre pousses végétatives semblent nécessaires.

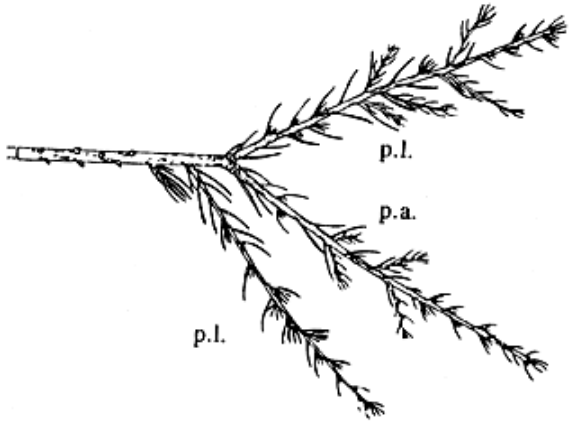

Fig. 1

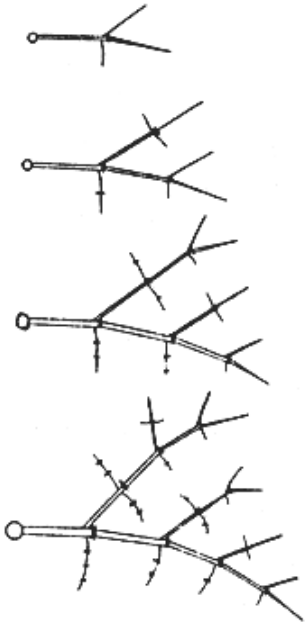

Fig 2

Fig. 3

Planche IV: L'étalement des branches par réitération partielle.
Figure 1: Formation d'une fourche à l'extrémité d'une branche. p.l: pousse latérale sur la branche; p.a.: pousse apicale. **Figure 2: Agencement des duplications successives au sein de la branche.** ( ) arrêt de croissance interannuel. **Figure 3: Schéma d'une branche portant des rameaux longs réitérés.**

La floraison femelle affecte les rameaux courts portés par les axes les plus vigoureux: le tronc (souvent les pousses sylleptiques émises par le tronc), la branche (Planche V, Figure 2) et lorsque la branche est plus âgée, le rameau long réitéré (Planche V, Figure 3). La première floraison est peu abondante et n'affecte que des rameaux courts situés dans une zone bien déterminée au sein de la cime: dans la partie haute et médiane de l'arbre, la floraison se manifeste sur les unités de croissance des branches les plus proches du tronc, tandis que dans la partie basse, les unités de croissance affectées des branches sont plus éloignées du tronc (Planche V, Figure 1).

Au fil des floraisons successives, la zone florifère se rapproche de la périphérie de l'arbre en envahissant progressivement sa cime.

L'arbre adulte poursuit son développement sans grande modification de son fonctionnement global. Dans la partie haute, de nouvelles branches naissent et se développent conformément à l'unité architecturale de l'espèce, tandis que dans la partie médiane elles augmentent de taille en dupliquant partiellement l'architecture élémentaire. Les branches les plus basses forment à leur extrémité des pousses annuelles de plus en plus frêles et courtes et finissent par mourir.

Plus tard, au cours du vieillissement, on observe une diminution progressive de la taille et de la faculté de redressement des pousses annuelles du tronc qui gardera, au cours des phases ultimes du développement, une direction de croissance oblique à horizontale et adoptera progressivement le mode de développement d'une branche. Cette modification du fonctionnement du tronc s'exprimera par la mise en place de la "table", caractéristique des Cèdres âgés. La plus ou moins grande précocité d'apparition de cette phase qui va déterminer la hauteur finale des individus, semble fortement liée aux conditions de leur croissance. Actuellement en cours d'étude, cette phase ultime fera l'objet d'une description ultérieure.

DISCUSSION

Les stades de développement décrits précédemment traduisent les événements morphologiques qui jalonnent la vie du jeune Cèdre et peuvent se résumer comme suit:

- La plante s'édifie selon son unité architecturale. Le tronc orthotrope à développement monopodial et rythmique porte des étages de branches ramifiées en rameaux longs qui portent eux-mêmes des ramilles et des rameaux courts.
- Au cours du développement, les branches âgées augmentent leur volume grâce à un processus de réitération partielle de l'unité architecturale.
- La sexualité apparaît et envahit peu à peu la cime.

Le développement du Cèdre s'inscrit donc dans une séquence précise et ordonnée de différenciation qui aboutit à la mise en place progressive de son architecture et à l'édification du tronc. Cette séquence peut toutefois être pertubée ou modulée par divers événements qui, lorsqu'ils affectent le fonctionnement du tronc, vont avoir une incidence considérable sur la qualité de celui-ci. Le fonctionnement monopodial et orthotrope du tronc pourra être pertubé par deux événements majeurs comme la mort de son apex ou la modification de son fonctionnement. Dans les deux

cas, l'arbre pourra réagir et rétablir une dominance apicale par la formation d'un ou plusieurs relais, ce qui entraînera le plus souvent une déformation ou un défaut du tronc.

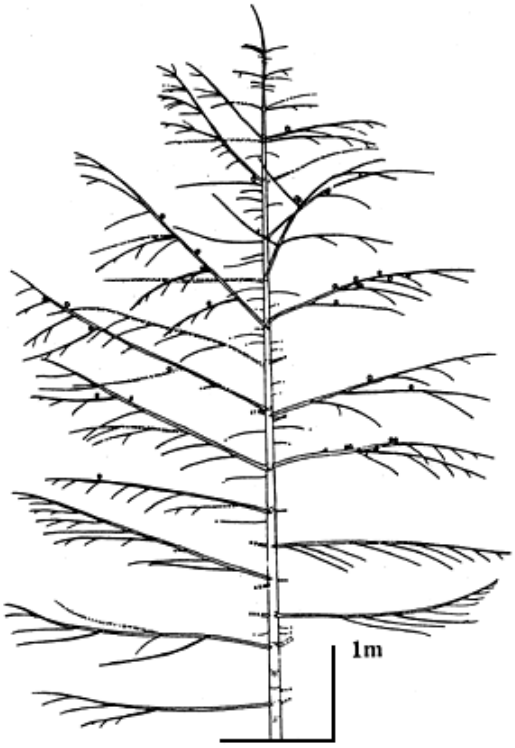

Fig . 1

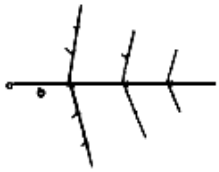

Fig . 2

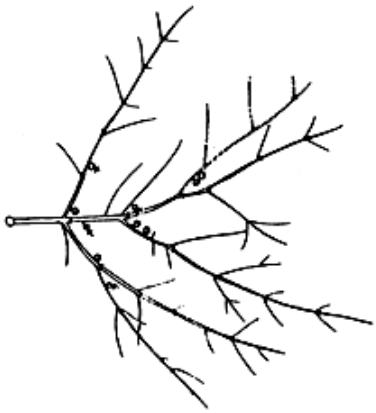

Fig. 3

Planche V: Position des cônes femelles.
Figure 1: Schéma de l'arbre (vue en élévation). ( ): cône femelle non pollinisé; ( ): cône femelle pollinisé. **Figure 2: Schéma d'une branche jeune** (vue de dessus). ( ) arrêt de croissance interannuel. **Figure 3: Schéma d'une branche âgée** (vue de dessus).

Au cours du développement de l'arbre, divers traumatismes (gelées de printemps affectant les bourgeons juste après leur débourrement, déssèchement, activités des oiseaux...) peuvent endommager le bourgeon ou la pousse terminale du tronc entraînant leur mort ou leur cassure. Ceci se traduit en général par une dédifférenciation du méristème d'un bourgeon ou d'un axe situé juste en dessous du traumatisme. Ce nouvel axe formé presente un développement semblable à celui de l'épicotyle mais montre plus rapidement une régularité dans la répartition et la structure de sa ramification. Dans quelques cas, plusieurs mérisfèmes vont se développer et une fourche apparaîtra (Planche VI, Figure 3). Si un seul relais se met en place, il pourra reformer une flèche unique et régénérer parfaitement la partie blessée en reproduisant fidèlement l'architecture élémentaire de l'arbre (Planche VI, Figure 1).

Dans quelques cas, la pousse annuelle terminale du tronc ne se redresse pas et garde une direction de croissance oblique. Généralement, dans la zone de courbure, l'année suivante, un rameau latéral (souvent initié par le méristème d'une pousse sylleptique) se redresse et tend à se placer dans le prolongement du tronc qu'il remplacera peu à peu (Planche VI, figure 2). Dans ce cas, le tronc initial garde sa direction de croissance oblique à horizontale et évolue en branche. De par son origine, celle-ci conserve une

insertion presque verticale et forme, sur l'arbreplus âgé, une structure particulière qui donnera un "ramicorme".

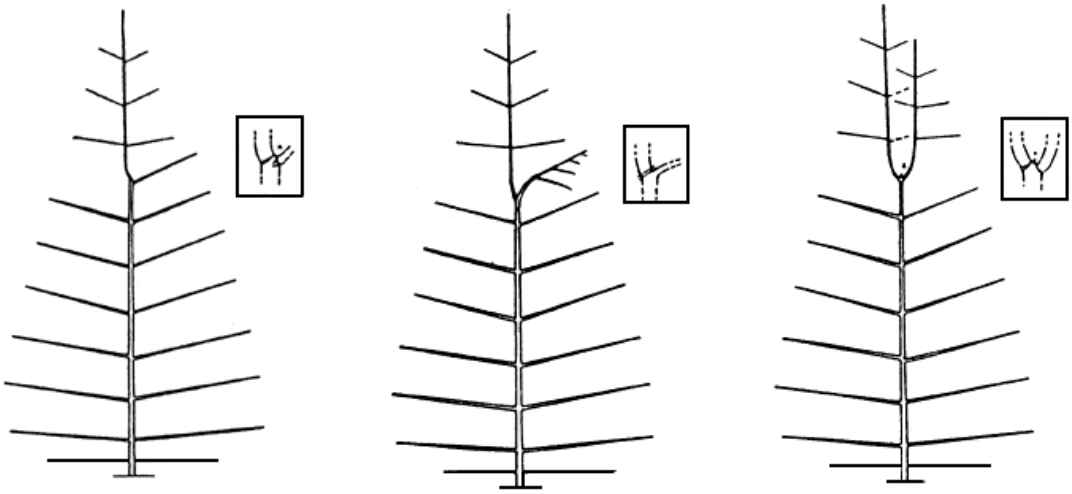

Fig. 1 **Fig. 2** **Fig. 3**

Planche VI: La réitération totale chez le Cèdre.
Figure 1: Réitération totale à la suite de la mort du méristème apical du tronc. Figure 2: Réitération totale à la suite de l'affaissement du tronc. Figure 3: Formation d'une fourche à la suite de la mort du méristème apical du tronc.

Ces divers mécanismes de régénération de l'architecture élémentaire du Cèdre peuvent aboutir à des déformations plus ou moins importantes du tronc. Néanmoins, leurs effets peuvent néanmoins être limités par un repérage précoce et une taille de formation adéquate.

CONCLUSION

Ces premières observations sur l'architecture du Cèdre de l'Atlas ont permis de décrire les caractéristiques de son développement de la germination à l'âge adulte. L'analyse architecturale a révélé, chez cette espèce, une unité architecturale caractérisée par cinq catégories d'axes et l'importance des phénomènes de réitération partielle de cette unité dans le développement et l'étalement des branches.

D'autre part, ces travaux font ressortir les modalités de réaction de l'arbre à divers événements affectant le fonctionnement de ses axes édificateurs, notamment le tronc.

Des études ultérieures permettront de préciser la répartition des inflorescences au cours des floraisons successives de l'arbre, de mieux comprendre les phases ultimes de son développement et d'analyser plus finement l'influence des conditions de croissance sur son développement architectural.

Dans les cédraies du Sud de la France, une grande variabilité dans la forme des arbres est observée et se traduit par une hétérogénéité dans le comportement des branches (horizontales, obliques et dressées) des individus d'un peuplement. Cette hétérogénéité traduit une variabilité intra-specifique qui pourrait être le résultat de la diversité des provenances. A cet égard, il serait intéressant d'analyser des individus ou des peuplements de diverses provenances connues afin de mieux cerner la variabilité morphologique et architecturale de cette espèce.

BIBLIOGRAPHIE

Barthelemy D., (1988). Architecture et sexualité chez quelques plantes tropicales: le concept de floraison automatique. Th. Doct. Univ. Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 262 p.

Barthelemy D., Edelin C. et Halle F., (1989). Architectural concepts for tropical trees. In: Tropical forests. Holm-Nielsen, L.B., Nielsen, I.C. et Balslev, H., ed. Academic Press, London, 89-100.

Barthelemy D., Edelin C. and Halle F., (1991). Canopy Architecture. In: Physiology of Trees, ed. by A.S. Raghavendra, 1-20.

Edelin C, (1977). Images de l'architecture des Conifères. Th. Doct. 3e Cycle, Univ. Montpellier II, 255 p.

Edelin C, (1986). Stratégie de réitération et édification de la cîme chez les Conifères. In: Compte-Rendu du Colloque International sur l'Arbre, Montpellier, 9-14 Sept. 1985. Naturalia Monspeliensà, Nº. hors série, 139-158.

Emberger L., (1938). Contribution à la connaissance des Cèdres et en particulier du Deodora et du Cèdre de l'Atlas. Revue de Botanique Appliquée et d'Agriculture Tropicale, Bull. nº198: 77-92.

Farjon A., (1990). Pinaceae, drawings and descriptions of the genera: *Abies, Ce drus, Pseudolarix, Keteleeria, Nothotsuga, Tsuga, Cathaya, Pseudotsuga, Larix* and *Picea. e*d. Koeltz Scientific Books, D-6240 Königstein/Federal Republic of Germany. 330 p.

Halle F. et Edelin C, (1987). L'analyse architecturale des arbres. In: 6e Colloq. sur les Recherches Fruitières, Bordeaux, 10-11 Déc. 1987, pp. 5-19. C.T.I.F.L., Pont de la Maye et I.N.R.A, Paris.

Halle F. et Oldeman R.A.A., (1970). Essai sur l'architecture et la dynamique de croissance des arbres tropicaux. Masson, Paris, 178 p.

Halle F., Oldeman R.A.A. et Tomlinson P.B., (1978). Tropical trees and forests. Spring Verlag, Berlin, 441 p.

Oldeman R.A.A., (1972). L'architecture de la forêt guyanaise. Th. Doct. Etat., Univ. Montpellier II, 247 p.

Oldeman R.A.A., (1974). L'architecture de la forêt guyanaise. Mémoire nº73, O.R.S.T.O.M., Paris, 204 p.

Parde J., (1976). Le cèdre dans la zone méditerranéenne française. Bull. Soc. Forestière de Franche Comté, vol 38, nº3, 54-61.

Toth J., (1970-1972). Historique du Cèdre sur le Mont-Ventoux. Bull. Soc. Et. Sci. nat. Vaucluse, 51-75.

Ann. Rech. For. Maroc, (1994), T(27), 381-415

البرمجة المتصلة بالهدف لتهييء الغابة والغيات متعددة
حالة تطبيقية على الأرز بالريف المغربي

ل.هلال
المدرسة الوطنية الغابوية للمهندسين
ص.ب. 511 سلا - المغرب

تقوم هذه الدراسة لفحص مدى تطبيق تقنيات البرمجة في ميدان استثمار أرز الريف المغربي لأهداف مختلفة. ولهذه الغاية تم إصدار برنامج قطع:

- أولا المستويات العليا التي تستهدف الوصول إليها عرفت بواسطة البرمجة بنموذج ذي هدف بسيط.
- ثانيا البرمجة بالهدف طبقت بواسطة نموذج ذي أهداف كثيرة لمعرفة سياسة القطع.

لقد بينت الدراسة أن كل الطرق للإستثمار المقترحة على مستويات مختلفة تؤدي للأهداف المتبعة في المدى القريب والبعيد.

نقترح كذلك بتغيير البنية الغير المعتدلة للغابة بالبنية المعتدلة في آخر مرحلة من التنظيم.

لقد تبين أن النماذج من نوع الإتجاه الواحد تستجيب لكل أهداف الإنتاج الشامل في حالة البنية المعتدلة التي تتجاوب مع الإستغلال في عمر160 سنة وكذلك للتوصل إلى الإنتاج المستمر عندما تكون الحالة العادية تتجاوب مع الإستغلال في عمر 80 سنة.

من ناحية أخرى تتحكم النماذج من نوع الإتجاه الواحد أكثر في الإنتاج المعاد فقط إذا كانت بنية الغابة في آخر المطاف تتجاوب مع الإستغلال في عمر 160 سنة

LA PROGRAMMATION LINEAIRE PAR L'OBJECTIF POUR L'AMENAGEMENT FORESTIER A OBJECTIFS MULTIPLES: UNE APPLICATION A LA CEDRAIE DU RIF MAROCAIN

HLALE.

Département d'Economie et Gestion
Ecole Nationale Forestière d'Ingénieurs
B.P. 511, Salé- Maroc

Résumé - *Cette étude examine l'application des techniques de la programmation linéaire à l'aménagement forestier multi-objectifs de la cédraie du Rif marocain. Un programme de coupes est développé. Premièrement, les niveaux maximums à atteindre des objectifs sont déterminés en utilisant la programmation linéaire standard- modèle à objectif simple. Ensuite, la programmation par l'objectif, modèle à objectifs multiples, a été appliquée pour déterminer une stratégie optimale de coupes considérant ces objectifs simultanément. L'analyses "d'échanges" est conduite.*

L'étude a montré que toutes les stratégies d'aménagement proposées, à des degrés différents, achèvent les objectifs à court- et à long-terme de l'aménagement. La structure très irrégulière de la forêt a été convertie à une autre régulière à la fin de l'horizon de planification. En outre, ceci a été accompli d'une manière garantissant un rendement plus ou moins soutenu.

Les modèles une-direction se sont révélés plus attractifs pour l'achèvement des objectifs des productions totales dans le cas ou la structure régulière est supposée consistante avec l'âge d'exploitabilité de 160 ans, mais aussi pour atteindre l'objectif du rendement soutenu lorsque l'état normal est considéré consistant avec l'âge d'exploitabilité absolu de 80 ans.

D'autre part les modèles une-direction contrôlaient mieux la production périodique seulement lorsque la structure de la forêt à la fin de l'horizon de planification est consistante avec un âge d'exploitabilité de 160 ans.

Cèdre / Rif marocain / programmation linéaire / coupes / aménagements / modèles.

Abstract - This study examines the application of linear programming techniques to a multi-objective forest management of the Rif Cedar forest of Morocco. A forest management schedule is developped. First, maximum achievement levels for management goals (timber and employment) are determined using standard linear programming- a single objective model. Then linear goal programming, a multi-objective model, is applied to detrmine optimal solutions for all goals simultaneously. A trade-off analysis was conducted.

The study showed that all management strategies proposed, to different degrees, achieved court and long term management objectives. An irregular forest structure was converted to a regular one at the end of the planning horizon. Furthemore, this was accomplished in a manner that sustained periodic volume and employment are garanteed.

One-way models revealed more suitable for a higher achievement of management goals in terms of the total production when the ending forest state is to be consistent with a longer rotation age (160 years), but also in stabilising production when this age is shortened to 80 years.

On the other hand two-way models controlled better the per-periodic productions only in the case where forest structure at the end of the planning horizon is consistent with a rotation age of 160 years.

Cedar / Rif of morocco / linear modeling / cutting / land-use planning / models.

PROBLEMATIQUE ET OBJECTIF DE L'ETUDE

En plus de son double rôle de production de bois et de fourrage pour le bétail, la forêt marocaine, en fonction de sa situation est utilisée pour la lutte contre l'érosion et la protection des sols, la sauvegarde du patrimoine faunistique et floristique, et la récréation. Ainsi, la forêt marocaine, par ses rôles environnemental et socio-économique se prête à des utilisations diverses. Cette multitude d'utilisations justifie l'application d'aménagement à objectifs multiples basé sur le principe de l'usage multiple.

Au Maroc l'aménagement forestier est conçu dans cet optique mais seul la vision subjective est utilisée pour répondre à l'ensemble des objectifs. Les plans d'aménagement sont essentiellement des règlements d'exploitation se limitant à la détermination de la surface ou du volume à couper, leur problème majeur est comment atteindre tous les objectifs qui s'imposent à la forêt et simultanément?

C'est dans ce contexte que la présente étude a été entreprise. Son objectif est le développement d'un modèle d'aménagement multi-objectifs pour la cédraie du Rif. La programmation par l'objectif est retenue comme technique appropriée pour une telle approche d'aménagement. Elle a l'avantage de considérer plusieurs objectifs simultanément avec leur priorité et leurs restrictions d'ordre technique, biologique ou socio-économique.

LA REGULATION FORESTIERE

Considérations

L'objectif primordial de tout aménagement forestier est de garantir la pérennité de la forêt pour assurer une production continue dans le temps. L'organisation de la forêt de telle sorte qu'elle soit capable de produire d'une façon continue et régulière dans le temps relève du domaine de la régulation forestière. Cette régularité ou soutenabilité du rendement à un niveau donné est désirable pour plusieurs raisons: (1) un meilleur accroissement biologique ou/et économique des peuplements, (2) une sécurité maximum conte le feu et le prasitisme, (3) une stabilité sociale assurée par un flux continu de revenu et (4) une base idéale de planification aussi bien à l'amont qu'à l'aval de la forêt.

La régulation est concernée avec les questions: quoi, quand, où, et combien couper (annuellement ou périodiquement) de la forêt?. Au début la réponse se limitait à combien couper (possibilité forestière), et des jugements subjectifs ont été utilisés pour décider sur la distribution temporelle (quand couper) et spatiale (où couper). Par exemple, couper d'abord les peuplements vieux et/ou malades et/ou les plus accessibles. Actuellement le programme de coupes ou ce qui est appelé par les anglo-saxons le "harvest scheduling" essaye de répondre à toutes ces questions simultanément en se basant sur: (1) les objectifs de l'aménagement, (2) le besoin et les exigences sylvicoles, (3) les conditions du marché, et (4) les conditions d'exploitation et de transport des produits récoltés (accessibilité).

Certains de ces facteurs sont plus ou moins en conflits entre eux; par exemple, les raisons économiques (marché) peuvent demander un volume supérieur/inférieur à ce qui est biologiquement possible. Grâce aux techniques de la recherche

opérationnelle une solution de compromis, considérant tous ces facteurs, est toujours trouvée. Parmi ces techniques, la programmation mathématique est la plus utilisée. Cette technique entraîne l'utilisation de modèles mathématiques qui peuvent être simples ou complexes, linéaires ou non-linéaires, et déterministiques ou stochastiques. Parmi les techniques de la programmation mathématique celles linéaires ont été de plus en plus développées et utilisées, notamment, en foresterie. Elles se sont révélées très efficaces pour l'étude et le choix des stratégies d'aménagement. Actuellement, elles sont considérées parmi les outils les plus importants du système de planification du fait qu'ils permettent l'intégration de plusieurs objectifs dans le système analysé.

LES MODELES DE LA PROGRAMMATION LINEAIRE POUR LA REGULATION FORESTIERE

La programmation linéaire standard se limitait à l'optimisation (maximisation ou minimisation) d'un objectif unique traduit sous forme linéaire appelé fonction objectif ou économique du modèle linéaire. Cette fonction est sujet à des contraintes aussi de forme linéaire.

Lorsque plusieurs objectifs doivent être optimisés, c'est la programmation multi-objectifs ou ce qui est parfois appelé "optimisation vecteur ou programmation vecteur" qui est utilisée. Certains de ces objectifs doivent être maximisés les autre minimisés. En générale, une solution satisfaisant totalement tous les objectifs est rarement trouvée, et comme règle la solution optimale correspond à une solution appelée solution "compromis". La programmation linéaire par l'objectif est probablement la technique la plus utilisée pour l'aménagement multi-objectifs appliquée aux ressources naturelles.

Dans l'approche présente les deux types de programmation linéaire (standard, et par l'objectif) seront utilisés pour développer un programme de coupes. La programmation linéaire standard sera utilisée pour fixer les niveaux maximums d'objectifs à atteindre. Ces niveaux d'objectifs correspondent aux solutions optimales des modèles linéaires du programme de coupes considérant chaque fois un seul objectif. Ensuite, la programmation par l'objectif sera utilisée pour l'élaboration du programme de coupes dans un cadre d'aménagement multi-objectifs.

LA PROGRAMMATION LINEAIRE STANDARD

La programmation linéaire standard est la forme de programmation mathématique la plus utilisée en foresterie. Ceci car la technique est (1) très flexible et applicable à plusieurs catégories de problèmes, (2) manipule un grand volume de données, (3) utilise des algorithmes documentés et disponibles sur la plupart des systèmes d'ordinateurs, et (4) possède des tests d'analyse de sensibilité très puissants et faciles à conduire et à examiner.

Les hypothèses du modèle de la programmation linéaire sont:

(1) la linéarité de la fonction objectif et des contraintes, (2) l'additivité, (3) la divisibilité (4) la finité, (5) déterminisme, et (6) non-négativité des variables. Ces hypothèses doivent être considérées car elles déterminent si oui ou non la technique peut être utilisée.

Toutes les approches de la programmation linéaire standard aux programmes de coupes peuvent être classées dans deux catégories de modèles: le Modèle I et le Modèle II (Johnson et Scheurman, 1977). La principale différence entre ces deux modèles réside dans la définition des variables décisionnelles ou activités. Le modèle I préserve l'identité de l'unité de coupe du début jusqu'à la fin de l'horizon de planification. Alors que dans le Modèle II cet identité n'est préservée que depuis la régénération

jusqu'à la coupe finale. Le modèle linéaire standard possède la forme suivante (Modèle I)::

$$\textbf{OPTIMISEZ} = \sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} C_{ij} X_{ij}$$

SUJET A: $\sum_{j=1}^{N} a_{ij} \begin{matrix} >= \\ <= \end{matrix} r_i$

$j = 1,2 \ldots N$ $\quad i = 1,2 \ldots M$

pour tout j

$X_j >= 0$

Ou:

Z : fonction économique (objectif) à optimiser
X_{ij} : variables de décision ou niveaux d'activités;
choses a propos des quelles la décision doit être prise.
C_{ij} : coefficients de la variable X_{ij} dans la fonction objectif
a_{ij} : coefficient de la variable X_{ij} dans la contrainte i.
r_i : coefficient représentant la ressource disponible pour la contrainte i.

LA PROGRAMMATION PAR L'OBJECTIF

Formulation

A l'opposé de la programmation linéaire standard qui optimise directement un seul objectif, la programmation par l'objectif n'optimise pas mais satisfait au maximum possible plusieurs objectifs à la fois. Elle minimise leurs déviations à partir de leurs niveaux d'objectifs spécifiés considérant leur priorité ou leur importance ainsi que leurs contraintes. Bien que la programmation par l'objectif diffère de celle standard dans la façon dont la solution est recherchée, elles ont, toutes les deux, les mêmes hypothèses, approches et procédures. Similairement à la programmation linéaire standard, la forme générale de la programmation par l'objectif est composée de deux parties: une fonction objectif et des contraintes linéaires. Mais, la fonction objectif est toujours de type minimisation. C'est une minimisation des déviations à partir des niveaux d'objectifs fixés. Les objectifs de l'aménagement sont considérés parmi les contraintes. Par conséquent, deux types de contraintes existent dans la programmation par l'objectif: des contraintes type objectif qui expriment le désir de l'aménagement et les contraintes dites physiques ou absolues qui représentent les exigences de l'environnement du système à analyser.

Ces deux types de contraintes diffèrent de deux façons: (1) les contraintes type objectif sont représentées dans la fonction objectif par le biais des termes "déviationnistes", alors que les contraintes absolues ne le sont pas, et (2) les contraintes absolues sont satisfaites totalement et avant les contraintes type objectif qui doivent être satisfaites qu'au maximum possible.

La forme générale du modèle mathématique de la programmation linéaire par l'objectif est la suivante:

$$\text{MINIMISE } Z = \sum_{g} (Wg1\ Dg^{1} + Wg2\ Dg^{2)}$$

SUJET A:

$$AX + Dg^{1} - Dg2 = b$$

$$>$$

$$BX = h$$

$$<$$

$$D^{1}_{g} * D^{2}_{g} = 0$$

$$X_{i}, Dg^{1}, Dg^{2} > = 0$$

Ou:

X : vecteur des variables de décision.
A, B : matrices des coefficients input-output reliant les contraintes et les niveaux d'objectifs, respectivement, aux variables de décision.
Dg^{1}, Dg^{2} : déviations négatives et positives, respectivement, à partir de l'objectif g. Elles mesurent la quantité de sous- ou sur- réalisation (achèvement) de l'objectif.
W : poids associé à la déviation positive ou négative de l'objectif.
b : vecteur des niveaux spécifiés d'objectifs à atteindre,
h : ressources disponibles.

$Dg^{1}*Dg^{2} = 0$ cet équation assure que la sur et la sous-réalisation d'un objectif donné ne peuvent pas être accommodés simultanément dans la solution.

Trouver la solution au problème ci-dessus implique la conduite de la valeur Z, représentant la somme de toutes les déviations par rapport aux niveaux spécifiés d'objectifs, à son minimum. Si Z est égale à zéro, alors toutes les déviations sont nulles; par conséquent tous les objectifs sont satisfaits totalement, et la solution dans ce cas est dite exacte. Dans le cas contraire, certains ou l'ensemble des objectifs sont sur-réalisés ou/et sous-réalisés.

Les modèles une-direction et deux directions

Deux formulations existent pour le modèle de la programmation par l'objectif: le modèle une-direction ou soit la sur- soit la sous-réalisation d'un objectif donné est une solution acceptable. Dans ce cas, les déviations dans une direction sont pénalisée c.a.d. éliminées de la fonction objectif. Si la sur-réalisation d'un objectif est une solution acceptable, la déviation positive est à éliminer, et inversement si la sous-réalisation est la solution acceptable alors, c'est la déviation négative qui est à éliminer. Dans le modèle deux-directions, les deux solutions de sur- et de sous-réalisation sont acceptables et, par conséquent, les deux déviations (positive et négative) figurent dans la fonction objectif.

<u>Analyse d'échange</u>

La décision concernant l'utilisation multiple de la forêt impliquent la considération de plusieurs objectifs d'aménagement qui sont souvent en conflit. Dans ce cas plusieurs alternatives ou stratégies d'aménagement sont possibles selon l'importance accordée à

chacun des objectifs. L'organe de décision doit connaître l'échange (compromisation) entre tous les objectifs avant de choisir la meilleure alternative d'aménagement. En utilisant la programmation par l'objectif deux modèles d'analyse d'échange existent: le modèle cardinal et celui préemptif.

Dans le modèle cardinal l'importance accordée aux différents objectifs de l'aménagement est sous forme cardinale c.a.d. exprimée sous forme d'un poids cardinal appliqué aux variables de déviation correspondant à l'objectif dans la fonction économique du modèle. L'attribution des différents combinaisons du poids fournit des solutions permettant d'atteindre différemment les objectifs considérés.

Dans le modèle préemptif le poids accordé aux différents objectifs est exprimé selon un ordre de priorité ou de satisfaction; alors l'objectif classé haut dans l'hiérarchie doit être satisfait en premier lieu par rapport à son suivant. Autrement dit l'objectif est accordé un poids cardinal égale à l'infini par rapport à son suivant dans le classement. Plusieurs auteurs sont contre l'utilisation de ce modèle en aménagement des forêts publiques ou la situation est plutôt une situation de compris que de préemption.

LES EXIGENCES DES MODELES DE LA PROGRAMMATION LINEAIRE EN MATIERE D'INFORMATION

La programmation linéaire par l'objectif minimise les déviations à partir des niveaux d'objectifs fixés. Par conséquent, le modèle exige non seulement la définition des fonctions économiques telle que la maximisation du volume à couper ou la minimisation du coût de l'aménagement mais, aussi la spécification de leur niveau optimum (maximum, minimum) à atteindre; c.a.d. combien de mètres cubes doivent être coupés ou combien de budget sera disponible pour l'aménagement? Donc, la première tâche de l'étude est la détermination de ces niveaux d'objectifs à atteindre. Dans notre cas ces niveaux seront déterminés par le modèle linéaire standard à travers une optimisation directe des objectifs considérés individuellement. Ensuite la programmation par l'objectif sera utilisée pour l'élaboration de scénarios d'aménagement en attribuant un poids aux différents objectifs considérés.

Le modèle général de la programmation linéaire pour un programme de coupes nécessite deux catégories d'informations: (1) les objectifs de l'aménagement, et (2) les contraintes qui sont imposées à ces objectifs.

Objectifs

La zone d'étude est la première série de la forêt de Beni Bounsar. Elle a une superficie de 4046 ha et presque mono-specifique ou le cèdre ***(Cedrus Atlantica,*** Manetti), occupe 93.65 pour-cent de la surface totale. L'aménagement en vigueur a distingué trois objectifs pour la forêt en question:

1- Sauvegarde des formations forestières existantes,

2- Approvisionnement de la population locale en bois de feu, et

3- Approvisionnement du marché local en bois d'oeuvre.

Le premier objectif peut être lié à trois faits: (1) les délits de coupes de bois, (2) le sur-pâturage, et (3) le défrichement. Toutes ces activités illégales sont menées à la recherche du revenu. Par conséquent, la sauvegarde de la forêt est liée directement ou indirectement à l'emploi de la population locale. Ce marché d'emploi peut être crée à travers un aménagement de production intensif très utilisateur de main d'oeuvre. Donc, fournir et sur une base régulière le maximum d'emploi est le premier objectif du modèle d'aménagement.

Le deuxième objectif de production de bois de feu est directement lié au troisième objectif, celui de la production de bois d'oeuvre. A côté du bois d'oeuvre, l'espèce cèdre produit aussi du bois de feu qui compte pour le tiers de la production totale de la région (S.I.A., 1980). Donc, le maximum de production du bois de cèdre sera le deuxième objectif du modèle.

Contraintes du modèle

Quatre types de contraintes doivent être respectées en satisfaisant les deux objectifs de l'aménagement (production de bois et de l'emploi): (1) contraintes de surface, (2) de rendement soutenu, (3) de normalité, et (4) de parcours.

Contraintes de surface

Ce type de contraintes est appelé aussi contraintes de surface pour les conditions initiales. Elle assurent l'attribution aux variables d'une unité de coupes donnée une surface au maximum égale à celle qu'elle contenait à l'origine. Sept contraintes, correspondant chacune à un type de peuplement, sont distinguées.

Rendement soutenu

Dans le but de satisfaire la demande en main d'oeuvre et en bois d'une façon régulière et soutenue les contraintes de rendement soutenu relatives à chacun des objectifs sont introduites dans toutes les périodes de planification. Il y aura au total 20 contraintes dans ce type contraintes (2 contraintes par période).

Contrainte de normalité

Pour assurer la perpétuité de la forêt, une structure régulière doit être obtenue à la fin de l'horizon de planification. Du fait de l'homogénéité de la qualité du site dans la zone d'étude, la régularité est considérée en terme de surface. La surface totale de la forêt sera répartie également entre les classes d'âge allant de zéro à l'âge d'exploitabilité, soit une gradation normale dans les âges. Considérons un intervalle de classes d'âge égale à 20 ans, 8 classes d'âges entre l'âge zéro et l'âge d'exploitabilité de 150 ans seront distinguées. Par conséquent, huit contraintes au total existent dans ce type de contraintes.

Contraintes de parcours

Ce type de contraintes assurera le taux de mise en défens du cinquième recommandé par la législation. La durée de mise en défens correspond à l'âge de défensabilité de l'espèce qui est de 16 ans. L'application des mises en défens dépend du mode de régénération proscrit (naturel ou artificiel), qui lui même dépend de l'âge du peuplement .

Dans le cas de la régénération naturelle, les 16 années de mise en défens s'appliqueront avant la coupe finale, et ceci pour permettre à la régénération de s'installer avant la coupe finale. Durant ce temps les coupes de régénération (ensemencement, secondaire(s)) peuvent être appliquées en fonction de l'évolution de la régénération.

Dans le cas de la régénération artificielle, les mises en défens s'appliqueront après plantation. Donc, pour une année donnée la surface totale à mettre en défens pour la régénération sera égale à la somme des surfaces qui doivent être régénérées artificiellement durant cette année, et naturellement durant les 15 dernières années.

Donc pour une année donnée la surface totale à mettre en défend annuellement doit être inférieure ou au maximum égale au cinquième de la surface totale de la forêt, soit 740 ha.

FORMULATION DU PROBLEME

Données de base du programme de coupes en utilisant la programmation linéaire

Etant donné l'objectif(s) de l'aménagement et ses contraintes (restrictions), la formulation mathématique du modèle linéaire de programme de coupes nécessite la définition des quatres éléments suivants:

1- la durée de l'horizon et de la période de planification,
2- l'âge minimum et maximum d'exploitabilité des peuplements,
3- les unités de coupes (types de peuplements), et
4- les types d'intervention.

Ces éléments déterminent les alternatives d'interventions possibles pour chaque type de peuplement, et par conséquent le nombre de variables de décision du modèle de coupes. L'association de ces variables sous forme d'équations constitue la fonction économique et les contraintes du modèle.

Horizon /période de planification

Un horizon de planification de 160 ans, correspondant approximativement à l'âge d'exploitabilité technique de 150 ans, a été retenu.

La période de planification a été choisie égale à 16 ans, correspondant à l'âge de défensabilité de l'espèce cèdre.

L'âge d'exploitabilité minimum est fixé à 70 ans correspondant à l'âge d'exploitabilité biologique. L'âge d'exploitabilité maximum est considéré égal à l'âge d'exploitabilité technique donnant les dimensions recherchées sur le marché, soit 150 ans. Mais, du fait que les peuplements qui ont atteint cet âge ou le dépassent même représentent plus de la moitié de la surface totale de la forêt et par conséquent seront automatiquement programmés pour la coupe et donc mises en défend dans la première période de planification ce qui engendrera alors la violation des contraintes de parcours et du rendement soutenu, l'âge maximum de 150 ans est inapplicable en pratique; en conséquence, l'âge maximum est différé à trois périodes de planification plus tard, soit un âge de 198 ans [= 150 + (3*16)]. Ceci permettra une certaine flexibilité et conformité pour la satisfaction de toutes les contraintes.

Unités de coupes

Les unités de coupes constituent des peuplements qui peuvent être prévus pour la coupe la même année. Dans le cas présent, les types de peuplements sont considérés les unités de coupes (tableau 1 et 2). Ces unités qui ne sont pas nécessairement contiguë maintiennent leur identité tout au long de l'horizon de planification.

Tableau 1: Types de peuplements utilisés dans l'analyse

TYPE DE PEUPLEMENTS		SURFACE (ha)	Nº
ADULTE	Normal	561.70	5
	Claire	855.90	7
	Epars	713.10	6
JEUNE	Dense	53.20	1
	Normal	850.20	3
	Claire	84.80	2
	Epars	290.40	4

Tableau 2: Caractéristiques des types de peuplements

Nº	Volume (m^3/ha)	Age (an)	Cl.30 (cm)	S.T. (G) (m^2/ha)	Densité (arbre/ha)	Surface (ha)
1	77.00	28	50.00	18.33	900	53.2
2	62.18	44	59.29	10.50	313	84.8
3	210.84	60	76.32	33.32	730	850.2
4	42.13	60	61.17	7.13	183	290.4
5	477.98	133	146.27	63.22	425	561.7
6	251.02	151	150.91	32.71	186	713.1
7	294.744	155	159.58	39.10	200	855.9

Types d'interventions

La série de production est soumise à la méthode d'aménagement de la futaie régulière. Les interventions sont les coupes d'amélioration (éclaircies) et de régénération, et les travaux de repeuplement. Dans ce cas un peuplement et soit éclaircié, coupé ou laissé comme il est. Ces séries de coupes recommandées pour les différents typès de peuplements durant l'horizon de planification constituent les types d'interventions.

Sur la base des unités de coupe (peuplements), les types d'interventions, les âges possibles d'exploitabilité, et le nombre de périodes de planification, 177 différentes alternatives (séquences) d'aménagement ont été identifiées pour tous les sept types de peuplements existants. Il y a, respectivement, 14, 25, 34, 34, 26, 22, et 22 alternatives, respectivement, pour les peuplements 1, 2, 3, 4, 5, 6, et 7. Comme exemple le tableau 3 donne toutes les alternatives d'aménagement pour le peuplement 1.

Tableau 3: Séquences ou alternative d'aménagement pour le type de peuplement 1

SEQ AMG	PERIODE DE PLANIFICATION										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	AGE FINAL
X11			1	10			1	10			48
X12			1	10			1	2	20		32
X13			1	10			1	2	3	30	16
X14			1	10			1	2	3	4	112
X15			1	2	20			1	10		32
X16			1	2	20			1	2	20	16
X17			1	2	20			1	2	3	96
X18			1	2	3	30			1	10	16
X19			1	2	3	30			1	2	80
X110			1	2	3	4	40			1	64
X111			1	2	3	4	5	50			48
X112			1	2	3	4	5	6	60		32
X113			1	2	3	4	5	6	7	70	16
X114			1	2	3	4	5	6	7	8	188

1, 2,...,8 = coupe intermédiaire à l'âge 68, 84, et 180.
10, 20,...,90 = coupe finale à l'âge 84, 100, et 196.

Coefficients de la fonction économique

En utilisant la formulation du modèle I, la solution du problème sera basée sur l'allocation ou l'affectation de la surface des unités de coupes à ses alternatives d'aménagement possibles. Les variables de décision notées X_{ij} seront donc définies comme la surface du peuplement (i) qui doit être aménagée selon l'alternative d'aménagement (j). Cette surface X_{ij} sera affectée à une alternative donnée en fonction de son coefficient K_{ij} qui mesure sa contribution dans la fonction économique. K_{ij} prendra des valeurs différentes selon l'objectif considéré. Dans le cas d'objectif de maximisation du volume de bois, les coefficients K_{ij} seront V_{ij} et représenteront le volume total obtenu (en m^3) durant l'horizon de planification à partir du peuplement (i) sous l'alternative d'aménagement (j). Ce volume est obtenu en sommant les volumes obtenus dans les différentes périodes de l'horizon de planification. Similairement, dans le cas d'objectif de maximisation de l'emploi, les coefficients K_{ij} seront E_{ij} et représenteront la quantité de main d'oeuvre, en homme-jours, générée durant tout l'horizon de planification par le peuplement (i) sous l'alternative (j).

Formulation mathématique du programme de coupes en utilisant la programmation linéaire standard

Cette phase de l'étude consiste à la détermination des niveaux maximums à atteindre des deux objectifs , à savoir la production maximale de bois et de l'emploi. Ces niveaux correspondent à la solution optimale obtenue lorsque chaque objectif est considéré comme une fonction économique du modèle linéaire.

Objectifs

MAXIMISATION DE LA PRODUCTION DE BOIS:

MAXIMISE

$$V=(\sum_{j=1}^{14} V_{1j}X_{1j}+\sum_{j=1}^{25} V_{2j}X_{2j}+\sum_{j=1}^{34} V_{3j}X_{3j}+\sum_{j=1}^{34} V_{4j}X_{4j}+\sum_{j=1}^{26} V_{5j}X_{5j}+\sum_{j=1}^{22} V_{6j}X_{6j}+\sum_{j=1}^{22} V_{7j}X_{7j})$$

Ou:

X_{ij} = surface (en ha) du type de peuplement (de la classe d'âge) i attribuée a l'alternative d'aménagement j.

V_{ij} = volume total (en m^3) obtenu durant l'horizon de planification à partir de la classe d'âge i sous l'alternative d'aménagement j.

MAXIMISATION DE L'EMPLOI:

MAXIMISE

$$E=(\sum_{j=1}^{14} V_{1j}X_{1j}+\sum_{j=1}^{25} E_{2j}X_{2j}+\sum_{j=1}^{34} E_{3j}X_{3j}+\sum_{j=1}^{34} E_{4j}X_{4j}+\sum_{j=1}^{25} E_{5j}X_{5j}+\sum_{j=1}^{22} E_{6j}X_{6j}+\sum_{j=1}^{22} E_{7j}X_{7j})$$

Ou:

X_{ij} = surface (en ha) de la classe d'âge i attribuée à l'alternative d'aménagement j.

E_{ij} = nombre total d'homme-jours (HJ) obtenu durant l'horizon de planification de la classe d'âge i sous l'alternative d'aménagement j.

Contraintes:

Chacune des deux fonctions objectif sus-mentionnés seront soumise à quatre types de contraintes: contraintes de surface, de rendement soutenu, de normalité, et de parcours.

CONTRAINTES DE SURFACE

$\sum_{j=1} X_{ij} = Ai$
pour i=1, j=1,...,14
pour i=2, j=1,...,25
pour i=3, j=1,...,34
pour i=4, j=1,…,34
pour i=5, j=1,...,26
pour i=6, j=1,...,22
pour i=7, j=1,...,22

CONTRAINTES DE RENDEMENTS SOUTENUS

Rendement soutenu bois

$v_k >= (1 + a) V_{k+1}$

$v_k <= (1-b) V_{k+1}$

Rendement soutenu emploi

$E_k >= (1 + a) E_{k+1}$

$E_k <= (1-b) E_{k+1}$

Ou:

$$V_k = (\sum_{j=1}^{14/25/34/34/26/22/22} V_{ijk}X_{ij})$$

$$V_{k+1} = \left(\sum_{j=1}^{14/25/34/34/26/22/22} V_{ij(k+1)} X_{ij} \right)$$

$$E_k = \left(\sum_{j=1}^{14/25/34/34/26/22/22} E_{ijk} X_{ij} \right)$$

$$E_{k+1} = \left(\sum_{j=1}^{14/25/34/34/26/22/22} E_{ij(k+1)} X_{ij} \right)$$

Ou :

V_K = volume total de bois coupé dans la période k.
V_{ijk} = volume de bois obtenu de la classe d'âge i sous l'ait. d'aménagt. j pendant la période k ($V_k = \sum V_{ijk}$).
E_k = nombre d'homme-jours total produit dans la période k.
E_{ijk} = nombre d'homme-jours obtenu de la classe d'âge i sous l'ait. d'aménagt. J pendant la période k ($E_k = \sum E_{ijk}$).
a,b = fluctuations positives et négatives permises d'une période à l'autre (en décimal).

CONTRAINTES DE NORMALITE

$$\sum_{i=1}^{8} X_i = (ST)/8$$

Ou:

ST = surface totale de la forêt (en ha).
X_i = les variables de décision associées aux alt. d'aménagt. qui donnent la même classe d'âge entre zéro et l'âge d'exploitabilité à la fin de l'horizon de planification.

CONTRAINTES DE PARCOURS

$G_{ka} = G_{k1} + 1/2G_{k2} + 1/4G_{k3} + 0G_{k4}$
$G_{kn} = 0G_{kl} + 1/2G_{k2} + 3/4G_{k3} + G_{k4}$

Ou:
G_{kn} = surface à régénérer naturellement
G_{ka} = surface à régénérer artificiellement

CONTRAINTES DE NON-NEGATIVITE

$$\sum_{j=1}^{14/25/34/34/26/22/22} X_{ij \geq 0}$$

pour i =1,2,3,4,5,6,7

Formulation mathématique du programme de coupes par la par la programmation par l'objectif

Dans ce cas nous avons quatre objectifs:
1- Production totale maximale de bois,
2- Production totale maximale de l'emploi,
3- Production périodique soutenue de bois, et
4- Production périodique soutenue de l'emploi.

Ces quatre objectifs entreront dans le modèle de la programmation par l'objectif comme étant les "contrainte objectif". Les contraintes absolues sont les mêmes que celles du modèle linéaire sauf celle du rendement soutenu.

Deux formulations seront considérées: le modèle deux- et une-direction. Dans le premier cas, la sur- et la sous-réalisation de l'objectif seront acceptées comme solution du problème, alors que dans le deuxième cas seulement la sur-réalisation qui sera une solution acceptable.

Dans le but de considérer l'importance relative de chaque objectif, un poids cardinal est attaché à ses termes de déviation dans la fonction "objectif". Finalement, la fonction économique des deux modèles (une- et deux-directions) de la programmation par l'objectif sont comme suit:

Objectif

Modèles à poids égaux

Modèle deux-directions:

MINIMISE

$$Z = DV^1 + DV^2 + DE^1 + DE^2 + \sum_{k=1}^{10} DV_k^1 + \sum_{k=1}^{10} DV_k^2 + \sum_{k=1}^{10} DE_k^1 + \sum_{k=1}^{10} DE_k^2$$

Modèle une-direction:

MINIMISE

$$Z = DV^1 + DE^1 + \sum_{k=1}^{10} DV_k^2 + \sum_{k=1}^{10} DE_k^2$$

Modèles a poids différents

Modèle deux-directions:

MINIMISE

$$Z = DV^1 + DV^2 + DE^1 + DE^2 + \sum_{k=1}^{10} WDV_k^1 + \sum_{k=1}^{10} WDV_k^2 + \sum_{k=1}^{10} WDE_k^1 + \sum_{k=1}^{10} WDE_k^2$$

Modèle une-direction:

MINIMISE

$$Z = DV^1 + DE^1 + \sum_{k=1}^{10} WDV_k^1 + \sum_{k=1}^{10} WDE_k^1$$

Ou:

D_g^1 et D_g^2 = sous- et sur-réalisation de l'objectif g, respectivement.

Wg = poids de l'objectif g (g = V, E, V_k, E_k),
V = volume total de bois (m^3) obtenu durant l'horizon de planification.
V_k = volume périodique de bois (m^3) obtenu durant la période k.
E = emploi total (HJ) produit durant l'horizon de planification.
E_k = emploi périodique (HJ) produit durant la période k.

Tous ces modèles sont sujets à deux types de contraintes: contraintes type obje et contraintes type physique ou (absolues).

Contraintes

Contraintes objectif

Production totale

Modèle deux-directions:

$V + DV^1 - DV^2 = 3032460$
$E + DE^1 - DE^2 = 4192823$

Modèle une-direction:

$V + DV^1 >= 3032460$
$E + DE^1 >= 4192823$

Ou:

V = valeur de la solution optimale, du modèle linéaire, de la fonction objectif production de bois.
E = valeur de la solution optimale, du modèle linéaire, de la fonction objectif production de l'emploi.

Production périodique soutenue

Modèle deux-directions:

$303246 = V_k + DV^1_k - DV^2_k$

$419282 = E_k + DE^1_k - DE^2_k$

Modèle une direction

$303246 <= V_k + DV^1_k$

$419282 <= E_k + DE^1_k$

Contraintes absolues

Ces contraintes sont les même que celles de surface, de parcours, et de normalité du modèle linéaire standard.

Entrée des problèmes et résolutions

Tous les problèmes ont été résolus en utilisant un logiciel de type simplex appelé LINDO, "the Linear, Interactive and Discrete Optimiser" (Shrage, 1987); il s'agit d'un optimisateur discret et interactif linéaire. La version "HYPERLINDO" d'une capacité matricielle 3000 variables par 2000 contraintes, tournant sur micro-ordinateur est utilisée dans la résolution des modèles.

RESULTATS DE L'ETUDE ET L'ANALYSE D'ECHANGES

Les solutions sont comparées par leur niveau de performance qui est la production totale de bois et de l'emploi durant tout l'horizon de planification, par la production périodique, et par leur habilité de satisfaire les contraintes imposées.

Solutions de la programmation linéaire

Dans le but d'examiner l'effet des différentes contraintes sur la solution optimale, les deux problèmes de programmation linéaire correspondant aux deux objectifs de

l'aménagement, production de bois et de l'emploi, ont été résolus avec une seule contrainte à la fois.

Les deux tableaux (4 et 5) montrent que la contrainte du rendement soutenu est la plus limitative pour les deux objectifs de l'aménagement, ensuite vient la contrainte de normalité et finalement celle de parcours. Elles ont causé, respectivement, une réduction dans la production totale de bois de 35.54%, 26.63% et 18.73%. Aussi dans l'ordre, ces contraintes ont causé 46.66%, 32.40%, et 22.91% de chute dans la production totale de l'emploi. Ceci montre la difficulté de satisfaire la contrainte du rendement soutenu du fait de la structure initiale des peuplements qui est très déséquilibrée.

Lorsque toutes les contraintes sont considérées simultanément, les solutions des deux objectifs sont "infaisable", c.a.d. qu'il n'existe pas de solution optimale a ces deux modèles linéaires. Donc, les objectifs ne peuvent pas être satisfaits dans la limite de toutes les contraintes existantes, certains doivent être relaxées. La contrainte de rendement soutenu est la seule qui peut l'être car celle de parcours ne peut pas être relaxée du fait de son rôle social, et la contrainte de normalité est exigée pour assurer une production continue. La contrainte du rendement soutenu sera considérée comme objectif de l'aménagement. Dans ce cas un minimum de déviation des niveaux de productions périodiques de bois et de l'emploi sera recherché. Ces niveaux périodiques correspondront à leur total respectif obtenu durant l'horizon de planification divisé par dix (le nombre de périodes). Ces totaux ont été choisis comme étant la solution optimale des modèles linéaires sans la contrainte du rendement soutenu. Ces niveaux sont 3032461 m^3 et 4192823 Hj, respectivement pour la production totale de bois et de l'emploi; et les niveaux périodiques sont alors 303246 m^3 et 419282 HJ (Tableau 6).

Tableau 4: Formulation de la programmation linéaire objectif de production de bois effet des contraintes sur la solution optimale

CONTRAINTE	VOLUME		SURFACE MISE EN DEFENS	
	TOTAL (m^3)	DECLIN COMP.A C.SFCE (%)	TOTAL (ha)	COMPARE AU TAUX NORMAL (%)
Surface	4437611	.00	119115	100.60
Parcours	3606433	18.73	113749	96.07
Normalite	3255955	26.63	81824	69.11
R. Soutenu	2860380	35.54	73604	62.17

Tableau 5: Formulation de la programmation linéaire objectif de production de l'emploi effet des contraintes sur la solution optimale

CONTRAINTE	VOLUME		SURFACE MISE EN DEFEND	
	TOTAL (m^1)	DECLIN COMP. A C.SFCE (%)	TOTAL	COMPARE AU TAUX NORMAL (%)
Surface	6801087	.00	119115	100.60
Parcours	5243028	22.91	113749	96.07
Normalite	4597525	32.40	83257	70.32
R. Soutenu	3628010	46.66	73795	62.33

Tableau 6: Formulation de la programmation linéaire (toutes les contraintes appliquees sauf celle de soutenabilite)

PERIODE	OBJECTIF PRODUCTION DE BOIS			OBJECTIFS EMPLOI		
	Volume (m^3)	Emploi (HJ)	Surface mise en défend (ha)	Volume (m^3)	Emploi (HJ)	Surface mise en Défens (ha)
1	308086	362446	11840	308086	362446	11840
2	372307	516846	11840	372307	516846	11840
3	176451	258404	11840	176451	258404	11840
4	319865	387103	9369	319865	387103	9369
5	445949	620740	7329	445949	620740	7329
6	319395	487359	8323	319395	487359	8323
7	319224	487132	9091	319224	487132	9091
8	162226	189813	4262	162226	189813	4262
9	353431	527191	4830	353431	527191	4830
10	255527	355789	6677	255527	355789	6677
Total	3032461	4192823	85401	3032461	4192823	85401

Solutions de la programmation par l'objectif

Modèles de poids égaux

Lorsque les deux objectifs sont considérés de même ordre d'importance, c.a.d. un poids égal à l'unité est attribué à tous les termes de déviation dans la fonction objectif, relativement plus d'achèvement des niveaux de productions totales à été obtenu dans le cas du modèle une-direction que dans celui à deux-directions. Mais, les deux

modèles ont permis une sous-rélisation de ces objectifs par rapport aux niveaux fixés. En effet, ces modèles une- et deux-directions ont engendré une sous-réalisation de -0.69% contre -2.16% et -1.83% contre -4.69%, respectivement, pour les objectifs de productions totales de bois et de l'emploi (tableaux 7 et 8). Mais, le modèle deux-direction a permis un grand achèvement des objectifs des productions périodiques. En effet, dans le modèle deux-directions, les productions périodiques de bois et de l'emploi varient de -14.09% à +5.30% et de +3.98% à -14.33% contre -16.91% à + 17.84% et -16.38% à +23.49% dans le modèle une-direction. Bien que les deux modèles ne violent pas la contrainte de parcours, le modèle deux-directions présente une certaine flexibilité

à l'égard de cette contrainte car 67.17% seulement du taux normal a été proscrit pour la mise en défens contre 70.55% dans le cas du modèle une-direction.

Ce type d'information est critique pour l'organe de décision pour décider sur la meilleure solution, le genre de questions que doit se poser: Est-ce que une solution avec, respectivement, 0.69% et 1 83% moins de réalisation dans les objectifs des productions totales de bois et de l'emploi, et avec des fluctuations périodiques respectives de 34.75% et 39.87% est plus importante qu'une solution avec 2.16% et 4.69% de sous-réalisation de ces objectifs, mais seulement avec des fluctuations de 19.39% et 18.31%? Autrement dit, pour gagner, respectivement, 15.36% et 21.56% de stabilité dans les productions périodiques de bois et de l'emploi, 103252 m^3 et 232965 Hj doivent être sacrifiés. C'est ce type d'analyse d'échanges que le système de décision a besoin de connaître pour évaluer les différentes alternatives d'aménagement. Un des aspects de la programmation par l'objectif qui fournissent ce type d'information est le modèle cardinal.

Tableau 7: Formulation de la programmation par l'objectif modèle deux-direction (tous les objectifs ont un poids = 1) état final consistent avec a.E. = 160 Ans

PERIODE	VOLUME		EMPLOI	SURFACE EN DEFFEND	
	(m^3)	ACHVMNT (%)	HJ)	ACHVMNT (%)	(ha)
1	307011	1.24	359206	-14.33	11840
2	312517	3.06	375359	-10.48	11840
3	319315	5.30	419282	.00	11840
4	316179	4.26	419282	.00	8579
5	303246	.00	435978	3.98	6813
6	303246	.00	421811	.60	6501
7	293685	-3.15	419282	.00	5728
8	262978	-13.28	364653	-13.03	5259
9	288350	-4.91	413041	-1.49	5490
10	260532	-14.09	368386	-12.14	5640
TOTAL	2967059	-2.16	3996280	-4.69	79530

Tableau 8: Formulation de la programmation par l'objectif modèle une-direction (tous les objectifs ont un poids = 1) état final consistent avec a.E. = 160 ans

PERIODE	VOLUME		EMPLOI	SURFACE MISE EN DEFFEND	
	(m^3)	ACHVMNT (%)	HJ)	ACHVMNT (%)	(ha)
1	307011	1.24	359206	-14.33	11840
2	303246	.00	386504	-7.82	11840
3	303246	.00	398032	-5.07	11840
4	322770	6.44	419282	.00	9369
5	357353	17.84	500184	19.30	6681
6	340659	12.34	517774	23.49	7987
7	275267	-9.23	398515	-4.95	7718
8	251962	-16.91	350599	-16.38	5238
9	293009	-3.38	419282	.00	5341
10	257060	-15.23	366892	-12.50	5677
TOTAL	3011583	-6.96	4116270	-1.83	83531

Modèles a objectifs de différents poids

Trois combinaisons de poids sont testées dans les deux types de formulation modèles une et deux-directions. Les deux premières combinaisons attribuent le poids 1000 aux objectifs des rendements bois et emploi soutenus séparément chacun dans un modèle. La troisième combinaison attribue ce poids à ces deux objectifs dans le même modèle. Le tableau 9 donne les résultats de toutes ces formulations.

Lorsque l'objectif du rendement-bois soutenu est attribué le poids 1000, le poids 1 étant attribué à tous les autres objectifs, la solution des deux modèles, une- et deux-directions, est exactement la même, 3.13% et 7.65% de sous-réalisation des objectifs des productions totales sont obtenues, respectivement, pour le bois et l'emploi; les fluctuations des productions périodiques étaient de 16.03 % et 24.91 %, respectivement.

Comparativement aux mêmes modèles dans le cas précédent, ou un poids de 1 était accordé à tous les objectifs, dans le modèle deux-direction, un gain de 3.36 points dans les fluctuations de la production périodique du bois a entraîné une perte de 6.60 points dans les fluctuations de la production périodique de l'emploi et, respectivement, 0.97 % et 2.96% dans les productions totales de bois et de l'emploi. Dans le modèle une-direction, le gain dans les fluctuations des productions périodiques de bois et de l'emploi était, respectivement, de 18.72% et 14.96%, mais la perte dans les productions totales respectives était de 2.44% et 5.82%.

Lorsque l'objectif du rendement-emploi soutenu est donné le poids de 1000, les deux modèles ont produit, relativement, plus d'achèvement que précédemment exception faite pour le rendement-emploi soutenu. Similairement au cas précédent, le modèle une-direction a permis un grand achèvement des productions totales de bois et de l'emploi: -0.94% et -4.29% contre -2.35% et -5.15%, mais moins d'achèvement des productions périodiques était obtenu: 20.53% et 21.98% contre 19.92% et 14.33%.

Lorsque les deux objectifs du rendement bois et emploi soutenu sont attribués le poids 1000, et comparativement au cas ou le poids a été attribué uniquement au rendement-bois soutenu, le modèle deux-directions a permis moins de fluctuations aussi bien dans la production périodique de bois (13.64% contre 16.03%) que dans celle de l'emploi (13.21% contre 22.12%). Le modèle a permis aussi un gain dans la production totale de l'emploi (-5.55% contre -7.65%), mais une légère perte dans la production totale du bois a été occasionnée (-3.49% contre -3.13%). Le modèle une-direction a permis un gain dans les deux productions totales (-2.16% et -4.69% contre -3.13 % et -7.65 %) et dans celle périodique de l'emploi; seule la production périodique de bois a connu plus de fluctuations (19.39% contre 16.03%). Comparativement au cas ou le poids a été attribué au rendement-emploi soutenu, les deux modèles ont réagit similairement aux changements, un gain dans les fluctuations des productions périodiques et une perte dans les productions totales ont été obtenue.

Tout le raisonnement entrepris jusqu'à présent considère une structure régulière à la fin de l'horizon de planification consistante avec l'âge d'exploitabilité technique de 160 ans. Cet âge est deux fois supérieur à l'âge d'exploitabilité biologique ou absolue. Une analyse des conséquences de l'application d'un tel âge d'exploitabilité sur l'achèvement des différents objectifs a été conduite. Pour ce faire tous les modèles précédents ont été reformulés avec une structure régulière consistante avec l'âge d'exploitabilité biologique de 80 ans. Les résulta i de tous ces programmes sont résumés dans le tableau 10.

Deux conclusions fondamentales peuvent être tirées de cette analyse, premièrement, et contrairement à tous les modèles précédents qui produisaient des solutions sous-réalisant les deux objectifs des productions totales, dans ce cas tous les modèles surréalisent ces objectifs, mais avec des fluctuations périodiques plus grandes. Deuxièmement, le modèle une-direction, qui permettait dans le cas précédent uniquement une meilleure satisfaction des objectifs de productions totales, a permis aussi une meilleure satisfaction des objectifs des productions périodiques, soit un meilleur contrôle du rendement soutenu.

Dans le cas des modèles de poids égaux, le modèle une-direction s'est révélé sans doute le meilleur: il a permis un gain de 11.91 % et 18.14%, respectivement, dans les productions totales de bois et de l'emploi, et ceci avec plus de 50.34% et 32.30% de fluctuations dans leur production périodique respective.

Tableau 9: Formulation de la programmation par l'objectif achèvements de tous les objectifs état final consistent avec a.E. = 160 ans

MODELE ACHEVEMENTS			POURCENTAGE FLUCTUATIONS						MISE EN DEFEND
BOIS EMPLOI			BOIS			EMPLOI			(ha)
…….% ……			MAX.	MIN.	AMPL	MAX.	MIN.	AMPL	
T1	-2.16	-4.69	5.30	-14.09	19.39	3.98	-14.33	18.31	79530
O1	-.69	-1.83	17.84	-16.91	34.75	23.49	-16.38	39.87	83531
T2	-3.13	-7.65	.00	-16.03	16.03	2.79	-22.12	24.91	77222
O2	-3.13	-7.65	.00	-16.03	16.03	2.79	-22.12	24.91	77222
T3	-2.35	-5.15	5.30	-13.62	18.92	.00	-14.33	14.33	79039
O3	-1.94	-4.29	6.44	-14.09	20.53	7.65	-14.33	21.98	79804
T4	-3.49	-5.55	.00	-13.64	13.64	.00	-13.21	13.21	78362
O4	-2.16	-4.69	5.30	-14.09	19.39	3.98	-14.33	18.31	79530

T1: modèle deux-direction, tous les objectifs ont un poids de 1.

O1: modèle une-direction, tous les objectifs ont un poids de 1.

T2: modèle deux-direction, rendement-bois soutenu a un poids de 1000.

O2: modèle une-direction, rendement-bois soutenu a un poids de 1000.

T3: modèle deux-direction, rendement-emploi soutenu a un poids de 1000.

O3: modèle une-direction, rendement-emploi soutenu a un poids de 1000.

T4: modèle deux-direction, rendements-bois et emploi soutenus ont un poids de 1000.

O4: modèle une-direction, rendements-bois et emploi soutenus ont un poids de 1000

Tableau 10: Formulation de la programmation par l'objectif achèvements de tous les objectifs état final consistent avec a.E. = 80 ans

MODELE ACHEVEMENTS			POURCENTAGE FLUCTUATIONS						MISE EN DEFEND
BOIS EMPLOI			BOIS			EMPLOI			(ha)
…….% ……			MAX.	MIN.	AMPL	MAX.	MIN.	AMPL	
T1	3.54	.00	48.29	-58.24	106.51	48.85	-64.67	113.52	93019
O1	15.45	18.14	55.67	.00	55.67	.00	55.67	66.89	108478
T2	10.35	11.26	50.29	.00	50.29	.00	50.29	59.87	102099
O2	15.45	18.14	55.67	.00	55.67	.00	55.67	66.89	108478
T3	9.29	8.55	52.68	-34.59	87.27	-34.59	87.27	57.27	100898
O3	14.01	15.70	46.16	.00	46.16	.00	46.16	58.98	106858
T4	10.61	10.15	53.72	-7.24	60.96	-7.24	60.96	60.28	102190
O4	14.01	15.70	46.16	.00	46.16	.00	46.16	58.98	106858

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

L'aménagement actuel en vigueur est essentiellement orienté vers la production de bois. Dans le passé une telle stratégie était adéquate car le bois était le seul produit recherché. Cependant, actuellement la demande d'autres produits tel que l'emploi et le fourrage (pâturage) est accrue à un point ou le changement dans les directions de l'aménagement est devenu nécessaire voire même obligatoire. Les modèles de planification et d'aménagement capables d'évaluer divers objectifs sont alors nécessaires. Autrement dit, des analyses d'échanges doivent être performées avant le choix définitif de la stratégie d'aménagement.

Dans le cas présent l'analyse d'échange entre quatre objectifs principaux de l'aménagement à savoir la production de bois et de l'emploi ainsi que leur stabilité dans le temps a été menée.

Toutes les stratégies proposées, à des degrés différents, achèvent les objectifs à court- et à long-terme de l'aménagement. Le maximum de sous-réalisation obtenu est de 3.49 et 7.65%, respectivement, pour les objectifs de production de bois et de l'emploi. La structure très irrégulière de la forêt a été convertie à une autre régulière vers la fin de l'horizon de planification. En outre, ceci a été accompli dans une manière garantissant un rendement soutenu.

Les modèles une-direction se sont révélés plus attractifs pour l'achèvement des objectifs des productions totales dans le cas ou la structure régulière est supposée consistante avec l'âge d'exploitabilité technique de 160 ans, mais aussi pour atteindre l'objectif du rendement soutenu lorsque l'état normal est considéré consistent avec l'âge d'exploitabilité absolue de 80 ans.

L'application d'une nouvelle stratégie d'aménagement avec un âge d'exploitabilité plus court, soit 80 ans, s'est montrée plus intéressante dans l'achèvement des objectifs de productions totales, mais elle l'est moins dans l'achèvement des productions périodiques.

Aujourd'hui, avec la demande incessante pour plusieurs produits forestiers, il est apparent que la forêt nationale doit être aménagée rationnellement. L'aménagement multi-objectifs est une meilleure alternative pour satisfaire ce besoin. La programmation par l'objectif est prouvé un outil d'aménagement multi-objectifs efficace pour adresser les questions d'allocation des ressources forestières.

BIBLIOGRAPHIE

Arp P.A. and Lavigne., (1982). Planning with goal programming: a cas study for the study of multiple-use of forest land. For. Chron. 58(5):225-233.

Ben M'bark M., (1985). Productivité et modèles de croissance du cèdre de l'Atlas *(Cedrus atlantica* manetti) et construction des tables de production. Mémoire de 3^{èmc} cycle Agronomie, option Eaux et Forêts, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Rabat, Maroc.

Bottoms K.E. and T.E. Bartlett., (1975). Resource allocation through goal programming. J. Range Mgmt. 28, 442-447.

Multiple objective planning at the Nicolet National Forest (1989): a goal programming input-output analysis case study. Ph. D. thesis, University of Wisconsin, Madison, Wisconsin.

Charnes A. and W.W. Cooper., (1961). Management models and industrial applications of linear programming. Vol. 1. John Wiley and Sons, New York. 467 pp.

Cohon J.L., (1978). Multiobjective and planning. Academic Press, New York. 333p.

Clutter J.L., J.C. Fortson, L.V. Piennar, Brister G.H. and R.L. Bailey., (1983). Timber management: A quantitative approach. John Wiley and Sons, Inc. New. York. 333p.

Coutu J. and B. Elertsen, (1960). Farm forestry through Linear programming. T. V. A., Div. of Forestry Relations (Norris, Tenn.) Report No. 236-60. 31 pp.

Curtis F.H., (1962). Linear programming the mgt. of a forest property. Journal of Forestry 60 (9), 611-616.

Dane C.W., C.N. Meador and J.B. Whitel, (1977). Goal programming in land use planning. J. For. 76(6), 325-329.

D'Aquino S.A., (1974). Optimum allocation of resources: A programming approach. Journal of Range management, 27, 228-233.

Davis, L.S. and K.N. Johnson., (1987). Forest management. 3rd ed. McGraw-Hill Book Company. 790p.

Davis K.P., (1966). Forest management: regulation and valuation. 2rd ed. McGraw-Hill Book company, New York. 519p.

Dyer A.A. et *al.,* (1979). Implication of goal programming in forest resource allocation. For. Sci., Vol. 25(4). 12p.

Dykstra D.P., (1984). Mathematical programming for natural resource management. McGraw-Hill Book Company. New York. 318p.

Elwood E.N., (1984). Heuristic development of stand treatment priorities: An alternative approach to mathematical programming. Ph. D thesis, Univ. of

Minnesota, St. Paul, MN.

Field D.B., (1973). Goal programming in Forest management. For. Sci. 19:125-135.

Ford-Robertson F.C. ED., (1971). Terminology of forest science, technology, practice and products. Soc. Am. For. Multilingual For. Terminology Ser. 1, 349p.

Hall G. R., (1963). The myth and reality of multiple use forestry. Nat. Res. J. vol.3, Nº 2: 276-290.

Hotvedt, (1982). Application of linear goal programming to forest harvest scheduling. S, J. of Agr. Econ. 1983. 6p.

Hugen. (no date). Les exploitations au Maroc. D.E.F.C.S., M.A.R.A. Maroc. Ignizio J.P., (1976). Goal programming and extensions. Lexington books.

Iriji Y., (1965). Management goals and accounting for control. Rand McNally, Chicago.

Johnson K.N. and H.I. Scheurman., (1977). Techniques for prescribing optimal timber harvest and investment under different objectives-discussion and synthesis. For. Sci. Monograph No. 18. 31p.

Khatouri M., (1987). A growth and yield model for uneven-aged cedar stands in the Ajdir forest in Morocco. These de Doctorat Es-Sciences Agronomiques, Institut Agronomique et Veterinaire Hassan II, Rabat Morocco.

Kidd W.E., JR., E.F. Thompson and D.H. Hoepnek, (1966). Forest regulation by linear programming: A case of study. J. For. 64, 611-613.

Lee S. M., (1972). Goal programming for decision analysis. Philadelphia: Auerback Publisher.

Lepoutre B., (1961). Recherches sur les conditions édaphiques de la régénération des cédraies Marocaines. Ann. Rech. For. Maroc No. 6. 211p.

Leuschner W.A., (1984). Introduction to forest resource management. John Wiley and Sons, Inc. New York. 298p.

Louks D. P., (1964). The development of an optimal program for sustained yield management. J. For. 62: 485-490.

Marion J., (1955). La régénération naturelle du cèdre dans les cédraies du rebord septentrional du Moyen-Atlas occidental calcaire. Ann. Rech. For. Maroc No. 1.

Mcardle R.E., (1962). Multiple Use-Multiple Benefits. J. For. 60:323-325.

Mcketta, (1984). The stability rationale in forest management. Ph. D thesis, Univ. Washington.

Messaoudi H., (1985). L'aménagement forestier et développement intégré de l'espace rural. Mémoire de licence Es-sciences Economiques, No.E/808, Univ. Mohamed 1^{r} , Faculté des Sciences Juridiques Economiques et sociales, Oujda, Maroc.

Messat S., (1986). Matrix Growth model for un-even aged *Cedrus atlantica* Manetti of Seheb forest in the Moyen Atlas of Morocco. These de Doctorat Es-Sciences Agronomiques, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Rabat Morocco.

M'hirit O., (1982). Etude Ecologique et forestière Des cédraies du Rif Marocain: Essai sur une Approach Multidimensionnelle de la Phytobiologie et de la Productivité du cèdre (*Cedrus atlantica* Manetti). These de doctorat Es-Sciences, Face. Sci. Tech. St. Jerome, Marseille, France.

Murphy D.L., (1981). A decision support system to harvest scheduling. Ph. D. thesis, Univ. of Minnesota, St. Paul, MN.

Nautiyal J. C. and P. H. Pearse., (1967). Optimizing the conversion to sustained yield-a programming solution. For. Sci. 13:131-139.

Navon D.L., (1971). TIMBER RAM ... a long rang planning method for commercial timber lands under multiple use management. U.S.D.A., Forest Service Research Paper PSW-70. 22 p. PSW Forest Experiment Station, Berkeley, Cal.

Quarouach M., (1987). La croissance de l'agriculture Marocaine de la dépendance alimentaire å l'autosuffisance.

Rensi G., (1979). Some aspects and issues in goal formulation. Workshop proceedings of the multiple objective planning, Misc. Report No. 7, College of Agriculture, University of Arizona.

Rustagi K.P., (1976). Forest management planning for timber production: a goal programming approach. Yale School of Forestry and Environmental Studies Bulletin 89.

Schrage L., (1987). Solution manual for Linear, integer and quadratic programming with LINDO. 3rd Edition. The Scientific Press, Redwood city, CA.

Linear, integer and quadratic programming with LINDO (1986), 3rd. Edition. The Scientific Press, Palo Alto CA.

User manual for linear, integer and quadratic programming with LINDO (1987), 3d ed. The Scientific Press, CA.

Schuler A.T., (1975). Multiple use resource management on national forests via goal programming. Ph.D. dissertation, Iowa state Univ. Ames, Iowa.

SENGUPTA J.K., (1972). Chance constrained LP with Chi-Square deviates. Management Science 19(3): 337-349.

S.LA. d'Alhoceima, D.E.F.C.S. et M.A.R.A., (1980). Aménagement des cédraies-subéraies et maquis du cercle de targuist. Vol. 1. Etude de base.

Aménagement des cédraies-suberaies et maquis du cercle de Targuist (1981). Vol. II. Procès verbal d'aménagement.

Etude de l'évolution de la végétation (1966-1986).

Stancu-Minasian I.M., (1984). Stochastic programming with multiple objective functions. D. Reidel Publishing company a member of the Kluwer Academic Publishers Group, Dordreccht / Boston / Lancaster.

Towell W. E., (1979). Prospectives in multiple-use management of forest resources. Proceedings of the symposium on multiple-use management of forest resources. Clemson, South Carolina.

Theiler T. C, (1959). Linear programming and optimal cutting policies. American Paper Industries 41(6):384-388.

Umlil J., (1982). Organisation et gestion de l'exploitation de coupes de bois au Maroc. Institut Supérieur de Commerce et d'Administration, Casablanca, Maroc.

Ware G. O. and J. L. Clutter., (1971). A mathematical programming system for the management of industrial forests. For. Sci. 17(4): 428-445.

Waterson A., (1965). Development planning- lessons of experience. Johns Hopkins Press, Baltimore.