

Programmation linéaire par objectif pour l'aménagement forestier

*Cas du bassin versant
de Moulay Bouchta au Maroc*

par Tayeb EL MAADIDI, Ahmed EL ABOUDI et El Aïd HLAL

***Une gestion forestière raisonnée
ne peut que s'envisager sur le long
terme. La programmation linéaire
par objectif est un outil
permettant d'intégrer différents
objectifs, critères et paramètres
pour aboutir à des conduites
sylvicoles adaptées.
Les auteurs appliquent
cette méthode à une forêt
du Rif marocain.***

Introduction

L'aménagement forestier est un processus qui consiste à développer une réflexion poussée et attentive sur ce qui pourrait se faire dans le futur (MARGHADI, 2009). Dans son acceptation la plus large, il sous-tend « décider ce que l'on souhaite faire d'une forêt compte tenu de ce qu'il est possible d'en faire et en déduisant ce que l'on devrait en faire » (FAO, 1991 *in* FAO, 1997). La large reconnaissance internationale des impératifs de développement durable vers la fin des années 80, a réorienté sa pratique vers la multifonctionnalité et la pluralité (WANG, 2004). La multifonctionnalité sous-jacente à sa mise en œuvre vise à une meilleure prise en compte des trois dimensions économique, écologique et sociales (HLAL, 1988).

Dans ce processus, des approches classiques (DUBOURDIEU, 1997), des approches incrémentales (BUTTOUD et YUNUSOVA, 2002) et/ou le recours à différentes méthodes mathématiques et d'aide à la décision pourraient aider le libre arbitrage de l'aménagiste pour asseoir une planification rationnelle (MARGHADI 2009). Le choix des méthodes envisageables dépend des types et de la portée des décisions (dimensions spatio-temporelles) : stratégiques, tactiques et opérationnelles (MITCHELL, 2004). Si, pour le niveau stratégique la programmation linéaire reste la plus adaptée et consiste à trouver les niveaux opti-

maux à atteindre par les différents objectifs quantifiables, le recours à la programmation en entier est le plus approprié pour des décisions tactiques intégrant des préoccupations spatiales : désignation des actes de gestion pour chaque unité de gestion considérée, prises en compte de contraintes d'adjacence et de continuité spatiale (HLAL, 1988).

Au Maroc, les aménagements forestiers sont réalisés par l'administration des Eaux et Forêts. L'approche adoptée épouse le schéma classique, rares sont les travaux qui ont tenté d'intégrer des méthodes d'aide à la décision (HLAL, 1988 ; MARGHADI, 2009).

Les espaces forestiers du Rif Marocain sont soumis à une forte pression qui concourt à la dégradation des ressources naturelles et qui se traduit par : i) une forte pression sur les parcours forestiers ayant comme répercussions l'accélération des phénomènes d'érosion du sol suite à la disparition du couvert végétal, ii) une surexploitation des ressources naturelles par la population locale pour constituer et/ou améliorer leurs revenus, et iii) des coupes abusives de bois d'énergie.

Ce contexte pourrait être explicité à travers certains chiffres éloquents :

– des pertes en sol qui pourraient atteindre, selon les milieux, des chiffres allant jusqu'à 3 000 tonnes/km²/an (AGENCE DE BASIN HYDRAULIQUE DE LOUKOUS, 2010), causant ainsi l'envasement des barrages à l'aval et la perte de leur capacité de stockage ;

– la charge pastorale réelle pesant sur les parcours est estimée à deux fois la charge d'équilibre par les services des Eaux et Forêts ;

– le déséquilibre entre l'offre et la demande en bois d'énergie ;

– une concurrence assez nette entre forêt et culture de cannabis ; cette dernière pratique culturelle étant plus rémunératrice.

S'inscrivant dans l'espace rifain, le bassin versant Moulay Bouchta (BVMB), objet de notre étude, est un espace forestier multifonctionnel. Il est caractérisé par une population usagère qui s'adonne à l'agriculture, l'arboriculture. La forêt naturelle est constituée de : i) formations naturelles : chêne-liège, ii) des plantations artificielles de pins (*Pinus pinaster* var. *maghrebiana*, *Pinus halepensis*, *Pinus radiata* et quelques pieds de *Pinus brutia*) et iii) du matorral. Différents acteurs sont concernés par l'aménagement durable de cet espace.

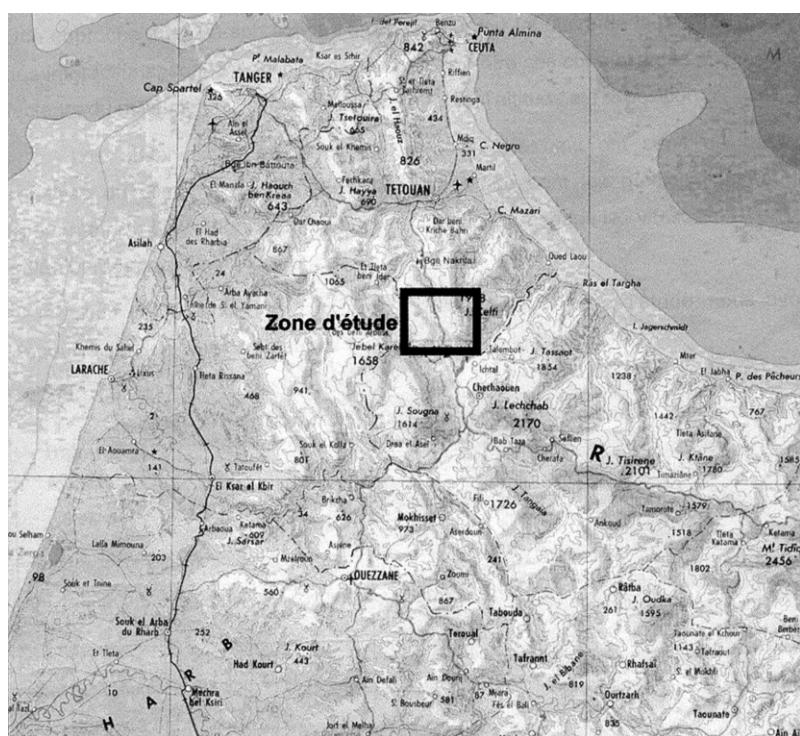
En effet et comme pour la majorité des sols dans le domaine rifain, le phénomène d'érosion hydrique menace les sols, en y induisant la perte de leur fertilité, et donc des rendements susceptibles d'y être réalisés. Aussi, la réduction des revenus se traduit par des implications sur la structure de la population dans la zone et dans les centres urbains avoisinants (exode rural). De même que les pertes de terre par sédimentation réduisent la durée de vie des infrastructures hydrauliques par envasement.

Ce travail entend contribuer à apporter des éléments de réponse à la problématique d'aménagement du bassin versant dans une finalité de pallier la dégradation des ressources naturelles et de planifier l'utilisation durable des ressources forestières. Ce travail consiste à développer un modèle d'aménagement multi-objectif basé sur un modèle de programmation linéaire pour la forêt du bassin versant, intégrant les trois objectifs d'aménagement : accroître la production forestière, améliorer les revenus des riverains et minimiser la sédimentation.

Zone d'étude

Le bassin versant Moulay Bouchta relève de la province de Tétouan, cercle de Tétouan et communes de Hamra, Beni Lait et d'El Oued. Il est situé dans le Rif occidental. Il fait partie du grand bassin versant du Rif, Oued Laou, et il est drainé par l'Oued Moulay Bouchta (Cf. Fig. 1).

Fig. 1 :
Localisation de la zone d'étude.



Les forêts du bassin versant sont gérées par le service forestier de Tétouan et le secteur forestier de Ben Karrich.

Les précipitations moyennes annuelles enregistrées dans le bassin versant étudié varient entre 604 mm et 1777 mm. Les températures sont relativement modérées ; la moyenne mensuelle varie de 12,7 à 24,9°C. Le climat est de type méditerranéen à été sec. La période sèche s'étale sur cinq mois. Le régime saisonnier du bassin versant est de type HPAE. Le bioclimat est de type sub-humide à variante chaude à humide à variante tempérée.

Le substrat géologique est principalement constitué par un bloc de roches marno-schisteuses tendres, une dorsale calcaire composée de calcaires massifs blancs et de dolomies grises et massives et des formations détritiques du quaternaire. Les sols peu évolués dominent le bassin versant avec 4938 ha. Cependant, les sols minéraux bruts et les sols bruns fersialitiques sont très peu représentés, avec respectivement 609 ha et 664 ha. Les sols bruns verticaux sont représentés par 1456 ha.

Les occupations du sol du bassin versant se présentent comme suit : la forêt naturelle de chêne-liège, les reboisements constitués à base de pin d'Alep, pin maritime et pin radiata, le matorral sur une superficie totale de 7664 ha, l'agriculture est à base de céréaliculture et d'arboriculture (Cf. Tab. I et Fig. 2).

Occupation du sol	ha	Superficie	%
Agriculture	4008	52,3	
Arboriculture	446	5,8	
Pin d'Alep	104	5,8	
Pin maritime	41	0,5	
Pin radiata	349	4,6	
Total	7664	100	

– fonction objectif de minimisation des apports solides à l'aval du BVMB.

Les contraintes

Elles sont de plusieurs ordres :

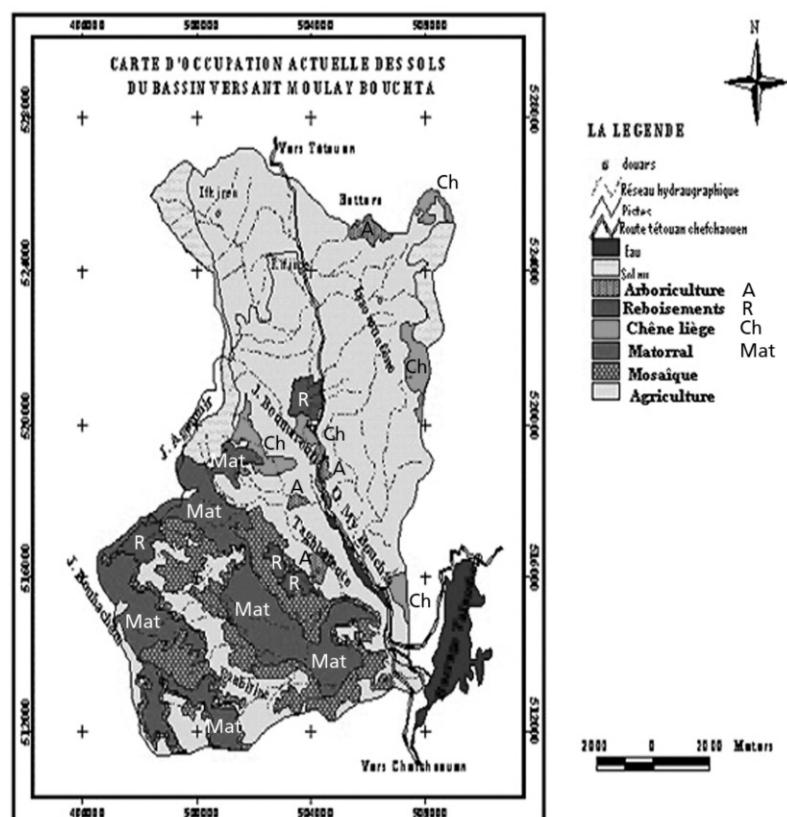
– contraintes de surface ou disponibilité de la terre : ce type de contraintes permet d'identifier la contenance de chaque unité d'aménagement lors de la formulation du modèle de programmation linéaire ;

– contraintes de soutenabilité de la production ligneuse : pour garantir la stabilité de la production ligneuse dans le temps, on essayera de réduire au maximum les fluctua-

Tab. I :
Occupation actuelle
des sols dans le bassin
versant de Moulay
Bouchta.

Source HCEFLCD, 2014.

Fig. 2 :
Carte d'occupation
actuelle des sols
du bassin versant
Moulay Bouchta.
HCEFLCD, 2014.



Approche méthodologique

Formulation des modèles de programmation linéaire standard

Fonctions économiques

En considérant chacun des objectifs d'aménagement suscités individuellement, on aura trois modèles de programmation linéaire standard et par conséquent, trois fonctions économiques à optimiser :

– fonction objectif de maximisation de la production de bois et de liège récolté à partir de la forêt du bassin versant Moulay Bouchta (BVMB) ;

– fonction objectif de maximisation de la production de miel générée par les ruches implantées dans les différents types de couverts arborés du bassin versant ;

Peuplement	Unité d'aménagement (i)	Surface (ha)
Reboisement de pin maritime	1	41
Reboisement de pin radiata	2	349
Reboisement de pin d'Alep	3	104
Jeune suberaie	4	264
Suberaie adulte	5	224
Vieille suberaie	6	86
Matorral	7	2140

Tab. II :

Unités d'aménagement identifiées dans la forêt du bassin versant Moulay Bouchta.

Essences	Age d'exploitabilité	
	minimal	maximal
Chêne liège - bois	75	100
- liège	20	Age d'exploitabilité
Pin maritime	40	50
Pin radiata	35	40
Pin d'Alep	50	60

Tab. III :

Les âges d'exploitabilité des différentes essences forestières du bassin versant Moulay Bouchta.

HCEFLCD, 2014.

Age	Opération	Produits	Nb d'arbres coupés /ha	Nb d'arbres restants/ha	Vol. (m ³ /ha)
0	Plantation	***	***	1100	***
3	El 1	***	***	1100	***
9	El 2	***	***	1100	***
15	Ec 1	BF	550	550	57,5
16	El 3	***	***	550	***
20	Ec 2	BS	180	370	22,2
25	Ec 3	BS	120	250	11,4
40	CR	BS	250	0	148,5

Age	Opération	Produits	Nb d'arbres coupés /ha	Nb d'arbres restants/ha	Vol. (m ³ /ha)
0	Plantation	***	***	1100	***
6	El 1	***	***	1100	***
12	El 2	***	***	1100	***
15	Ec 1	BF	550	550	37,8
15	El 3	***	***	550	***
20	Ec 2+ El 4	BS	180	370	46,4
25	Ec 3+ El 5	BS	220	150	59,3
35	CR	BS	150	0	64,5
Total	***	***	1100	***	208

Ec i : éclaircie i ; El i : élagage i ; CR : coupe rase ; BF : bois de feu ; BS : bois de service ; Vol : volume récolté.

tions des volumes récoltés entre les différentes périodes de planification ;

– contraintes de normalité forestière : on va essayer de conduire toutes ces forêts (naturelles et artificielles) vers un état totalement régulier représentant les différentes classes d'âges ;

– contraintes de parcours : ce type de contraintes va assurer un taux de mise en défens de 20 % de la surface totale des forêts. La durée de mise en défens retenue, dans notre cas, correspond à l'âge de défensabilité de l'espèce. Il est de 20 ans pour le chêne-liège, de 10 ans pour le pin maritime et le pin radiata, et de 15 ans pour le pin d'Alep.

Formulation des modèles de programmation linéaire par objectif

La fonction économique

Les solutions optimales des modèles de la programmation linéaire standard avec toutes les contraintes, ont été utilisées comme des niveaux à atteindre par la programmation par l'objectif.

En considérant un horizon de planification de 100 ans, les trois objectifs de l'aménagement susmentionnés seront considérés avec un même ordre d'importance, c'est-à-dire un poids égal à l'unité sera attribué à tous les termes de déviation de la fonction objectif.

Les contraintes

Ce modèle d'aménagement multi-objectif sera soumis aux deux types de contraintes objectifs et absolues.

Les contraintes « objectifs » du modèle d'aménagement multi-objectif représentent les trois objectifs de l'aménagement avec leurs niveaux spécifiés. La formulation de ce type de contraintes est la suivante :

– contraintes « objectif » de maximisation de la production ligneuse ;

– contraintes « objectif » de maximisation de la production de miel ;

– contraintes « objectif » de minimisation de la sédimentation ;

Tab. IV (ci-contre) :

Opérations sylvicoles appliquées au pin maritime.

Tab. V (ci-contre, en bas) :

Opérations sylvicoles appliquées au pin radiata. HCEFLCD, 2014.

où les contraintes « absolues » du modèle multi-objectif sont les exigences de l'aménagement à savoir la superficie disponible de la forêt, l'état normal des forêts qui doit être obtenu, le rendement soutenu des productions périodiques de bois et de liège et le parcours, elles sont définies comme auparavant.

Paramètres nécessaires à la formulation des modèles d'aménagement

Cf. Tab. II à VII.

Spatio-temporels

Horizon et période de planification

L'horizon de planification dépend de l'âge d'exploitabilité pour une forêt. Il est généralement égal à un et demi à deux fois cet âge (CLUTTER, 1983 ; *in* HLAL, 1988). Considérant les quatre essences forestières principales on a jugé utile de retenir l'âge d'exploitabilité maximum du chêne-liège qui est le plus grand, soit 100 ans ; cet âge est deux fois celui des autres essences.

Tenant compte des durées entre les différentes interventions chez les différentes espèces étudiées, l'horizon de planification est divisé en cinq périodes de planification de 20 ans.

Avant de formuler les modèles d'aménagement dont les objectifs sont la maximisation des volumes de bois et de liège produits par la forêt, la maximisation de la production apicole et la minimisation de la quantité des sédiments atterrissant à l'aval du bassin versant, il y a lieu tout d'abord d'énumérer les différents scénarios d'aménagement, selon un horizon de planification de 100 ans et des périodes de planification de 5 ans.

Scénarios d'aménagement

En se basant sur l'occupation actuelle des unités d'aménagement, de la sylviculture des peuplements, des âges d'exploitabilité des peuplements et du nombre de périodes de planification, 60 scénarios différents (alternative) d'aménagement ont été identifiés pour toutes les forêts du bassin versant. En effet nous avons identifié 31 scénarios d'amé-

Ci-contre, de haut en bas :

Tab. VI :

Opérations sylvicoles appliquées au pin d'Alep.

Tab. VII :

Opérations sylvicoles appliquées au chêne-liège.

HCEFLCD, 2014.



Photo 1 (ci-dessus) :
Forêt de chêne-liège au niveau du bassin versant Moulay Bouchta.
Photo T. EL MAADIDI.

Age	Opération	Produits	Nb d'arbres coupés /ha	Nb d'arbres restants/ha	Vol. (m ³ /ha)
0	Plantation	***	***	800	***
3 à 6	El 1	***	***	800	***
13	El 2	***	***	800	***
16	El 3	***	***	800	***
20	Ec 1	BF	400	400	44,2
24	Ec 2	BS	130	270	21,5
30	Ec 3	BS	90	180	14,8
50	CR	BS	180	0	44,4
Total	***	***	800	***	124,9

Ec i : éclaircie i ; El i : élagage i ; CR : coupe rase ; BF : bois de feu ; BS : bois de service ; Vol : volume récolté.

Période	Opérations	Produit	Quantité
Tous les 7 ans depuis l'âge de 7 ans jusqu'à la révolution	Débroussaillement	Arbousier Souches d'Erica Broussaille	3 tonnes/ha 20 kg/ha 2 tonnes/ha
A 20 ans	Déliegeage 1	Liège mâle	13,33 st/ha
A 30 ans			
A 40 ans			
A 50 ans			
A 60 ans			
A 70 ans			
A 80 ans			
A 90 ans			
	Déliegeage 2	Liège femelle	21 st/ha



Photo 2 (ci-dessus) :
Forêt artificielle de pin
au niveau du bassin
versant Moulay Bouchta.
Photo T. EL MAADIDI.

nagement pour la forêt de chêne-liège, 9 pour la forêt de pin d'Alep, 11 pour celle de pin maritime et 8 pour la forêt de pin radiata. En outre, le matorral constitue une composante à part et identifie un autre scénario d'aménagement, car il est traité de la même

Essence	Tarif de cubage peuplement
Pin radiata	$V = -40,59 + 6,17 G + 0,252 Hg$
Pin maritime	$V = -38,39 + 1,93 Hg + 6,53 G$
Pin d'Alep	$V = -31,46 + 1,81 Hg + 3,94 G$ BHCEFLH HCDhHH

V : volume à l'hectare (m^3) ; G : surface terrière à l'hectare (m^2) ; Hg : hauteur moyenne à l'hectare (m).



manière. Son traitement correspond aux prélevements d'arbousier, de souches d'*Erica* et de broussailles.

Paramètres de production

Pour estimer la production des peuplements artificiels, on s'est appuyé sur les tarifs de cubage réalisés dans la zone.

Cf. Tab. VIII à X.

Le matorral est essentiellement composé de *Cistus salviaefolius*, *Chamaerops humilis*, *Calycotome villosa* ainsi que des matorrals surpâturés situés en altitude sur roche mère calcaire au niveau de la dorsale calcaire.

Evaluation de l'érosion

Le modèle de Wischmeier (WISCHMEIER et SMITH 1960) a été utilisé dans le cadre du projet PREM (Pérennité des ressources en eau du Maroc) pour quantifier les pertes en sol sous différents types de sols et différents types d'occupations de sols (parcours, terrain de culture, végétation naturelle et reboisements de pins) au niveau du bassin versant.

Après avoir estimé les facteurs de l'équation de Wischmeier, en particulier l'indice d'érosivité des pluies, l'indice d'érodabilité des sols, le facteur topographique, l'indice de pratique culturelle et le facteur des pratiques antiérosives, les pertes en sol au niveau du bassin versant ont été évaluées. Les résultats sont présentés dans le tableau XI.

La production apicole

L'apiculture génère des revenus complémentaires directs aux populations riveraines. Cette activité, à fort potentiel de développement dans le bassin versant, compte tenu de l'importance des plantes mellifères est un marché porteur. Le tableau XII présente la production en miel des ruches installées sous différents types de couverts arborés dans le bassin versant Moulay Bouchta.

Tab. VIII (ci-dessus) :

Tarifs de cubage, peuplement par espèce.
HCEFLCD, 2014.

Photo 3 (ci-contre) :

Matorral dégradé à base de cystes au niveau du bassin versant Moulay Bouchta.

Photo T. EL MAADIDI.

Résultats et discussion

Résultats de résolution des modèles de la programmation linéaire standard

Dans le but d'examiner l'effet des différentes contraintes sur chaque objectif d'aménagement, les modèles de programmation linéaire correspondant aux trois objectifs d'aménagement considérés ont été résolus d'abord avec une seule contrainte et ensuite en combinant toutes les contraintes de l'aménagement. Tous les modèles d'aménagement ont été résolus grâce à un optimisateur de type itératif qui est le « LINDO ».

Ainsi les modèles d'aménagement pour chaque objectif ont été analysés, à savoir :

- modèle avec zéro contrainte (MZC) ;
- modèle avec la contrainte de normalité forestière ;
- modèle avec la contrainte de rendement soutenu de bois et de liège ;
- modèle avec la contrainte de parcours ;
- modèle avec toutes les contraintes combinées : disponibilité de la terre, normalité des forêts, rendement soutenu, et parcours.

Les résultats complets des modèles d'aménagement correspondant aux trois objectifs de l'aménagement et les effets des contraintes sur la solution optimale des modèles sont représentés dans les tableaux XIII, XIV et XV.

De haut en bas :

Tab. IX :

Superficies et caractéristiques dendrométriques des forêts artificielles.
HCEFLCD, 2014.

Tab. X :

Superficies et données dendrométriques moyennes des peuplements de chêne-liège.
HCEFLCD, 2014.

Tab. XI :

Résultats d'évaluation de l'érosion par le modèle de Wischmeier.
HCEFL7CD, 2010.

Tab. XII :

Production en miel sous chaque type de couvert.
Ministère de l'Agriculture, 2013.

Tableau XIII :

Solution du modèle d'aménagement relatif à la maximisation des volumes de bois et de liège récoltés.

Essence	Age moyen (ans)	Surface (ha)	Volume sur pied (m ³ /ha)	Accroissement moyen annuel (m ³ /ha/an)
Pin maritime :		41		
- Site A :	36	21,6	296,1	6,2
- Site B :	36	19,4	174,9	4,4
Pin radiata :		349		
- Site A:	35	183,7	219,6	8,2
- Site B :	35	165,3	154,8	4,7
Pin d'Alep :	35	104	145,2	3,8

Strates	Classe d'âge (ans)	Surface (ha)	Vol. Bois (m ³ /ha)	Poids de liège (qx/ha)	Reproduction	Mâle
Jeune futaie	10 – 40	264,5	44,1	***	16,9	
Futaie adulte	40 – 70	224,2	59,5	40	***	
Vieille futaie	70 – 100	86	43,6	14,8	***	

Taux moyen par utilisation de sol	Perte en sol (T/ha/an)
Parcours dégradé	5,02
Agriculture	4,25
Reboisement	1,06
Végétation naturelle	0,51

Type de couvert	Production moyenne (Kg/ruche/an)	Production moyenne (Kg/ha/an) (*)
Matorral	4,1	16,4
Chêne-liège	6,0	24
Reboisements de pins	2,5	10

(*) Pour augmenter le rendement apicole, la présence des ruches au niveau de la forêt doit être à raison de 4 par hectare (Menana, 2005).

Modèles	Total du volume de bois et de liège (m ³)	Réduction par rapport au MZC (%)
Zéro contraintes (MZC)	2 060 274	0
Normalité	1 905 753	7,5
Rendement soutenu (0 % de F)		Sol. Inf
Rendement soutenu (5 % de F)		Sol. Inf
Rendement soutenu (10 % de F)		Sol. Inf
Rendement soutenu (15 % de F)	1 802 327	12,52
Parcours	1 411 081	31,51
Toutes les contraintes (45% de F pour le rendement soutenu)	1 057 538	48,67

F : Fluctuations. Sol. inf : Solution infaisable.

MZC : modèle avec zéro contrainte.

Modèles	Total de la production apicole (Kg/an)	Réduction par rapport au MZC (%)
Zéro contraintes (MZC)	13457	0
Normalité	13033	3,15
Rendement soutenu (0% de Fluctuations)	13457	0
Parcours	12665	5,88
Toutes les contraintes	11902	11,55

Tab. XIV :

Solution du modèle d'aménagement relatif à la maximisation de la production apicole.

Solution des modèles d'aménagement avec toutes les contraintes combinées

La résolution du modèle d'aménagement en appliquant toutes les contraintes de l'aménagement a donné les résultats suivant :

- Objectif de maximisation de la production ligneuse

La solution optimale de ce modèle d'aménagement est non faisable, même à 15 % de fluctuations, elle ne s'avère réalisable qu'en tolérant des fluctuations de 45 % des productions périodiques.

La solution optimale de ce modèle permet de réaliser un volume total de 1 057 538 m³ en bois et en liège à l'issue de l'horizon de planification. On constate une réduction de la production de bois et de liège à hauteur de 48,7 % par rapport à la valeur du même modèle avec zéro contrainte. Ceci montre l'importance du volume ligneux à perdre, pour assurer un rendement soutenu.

Le volume ligneux à sacrifier pour garantir la normalité forestière (un taux de mise en défens ne dépassant pas 20 % de la surface de chaque type de formation) est de l'ordre de 1 002 735 m³.

Tab. XV :

Solution du modèle d'aménagement relatif à la minimisation de la sédimentation.

- Objectif de maximisation de la production apicole

La solution optimale de ce modèle d'aménagement donne une production apicole de 11 902 kg/an, ce qui correspond à un revenu moyen annuel de 465 DH/ruche. On constate une réduction de la production apicole de 11,55 % par rapport à la valeur du modèle avec zéro contrainte. Cette réduction renseigne sur le sacrifice en production apicole pour satisfaire toutes les contraintes de l'aménagement combinées.

- Objectif de minimisation de la sédimentation en aval

La solution optimale donne une quantité de sédiments de l'ordre de 2600 tonnes/an, soit un taux de sédimentation de 0,81 tonnes/ha/an pour la totalité de la forêt du bassin versant. On constate une augmentation de 46,5 % par rapport à la valeur du modèle avec zéro contrainte. Toutefois, la quantité de sédiments générée dans ce cas reste très réduite en comparaison avec le taux de dégradation spécifique estimé dans la zone à 17 tonnes/ha/an (BENNOUK, 2004).

- Etat normal de la forêt à la fin de l'horizon de planification

On constate que toutes les classes d'âge sont représentées avec les mêmes surfaces et, par conséquent, on obtient des forêts artificielles ainsi qu'une subéraie de structure normale à la fin de l'horizon de planification.

- Volumes périodiques de bois et de liège

La solution optimale du modèle d'aménagement correspondant à l'objectif de maximisation donne un volume total de 1 057 538 m³. L'analyse de cette solution optimale montre que les volumes périodiques varient de 34 898 m³ pour la troisième période à 74 027 m³ pour la première période (Cf. Fig. 3). Le volume périodique moyen est de l'ordre de 52 876 m³, dix périodes sur vingt qui ont atteint cette moyenne.

- La surface mise en défens à la fin de l'horizon de planification

Concernant le modèle d'aménagement relatif à la maximisation de la production ligneuse soumis à toutes les contraintes de l'aménagement combinées, le seuil de mise en défens recommandé par la législation forestière est respecté sur les 11 dernières périodes de planification. Cependant, pour les modèles d'aménagement correspondants à la maximisation de la production apicole et à la minimisation de la sédimentation, le seuil de mise en défens recommandé par la

Modèles	Total de sédiments (Tonne/an)	Augmentation par rapport au MZC (%)
Zéro contraintes (MZC)	1775	0
Normalité	1995	12,42
Rendement soutenu (0% de fluctuations)	1926	8,55
Parcours	2347	32,22
Toutes les contraintes	2600	46,50

législation est respecté pendant les 14 et 16 dernières périodes de planification respectivement.

Résolution du modèle de programmation linéaire par l'objectif

La programmation linéaire par objectif minimise les déviations à partir des niveaux d'objectifs à atteindre tout en considérant leurs contraintes. Les trois objectifs d'aménagements ont été considérés avec la même importance sur un horizon de planification de 100 ans.

La résolution du modèle d'aménagement multi-objectif a donné les résultats suivants :

- une sous-réalisation de l'objectif de production ligneuse à hauteur de 8,8 %. La production totale de bois et de liège est de 964 686 m³, soit 9647 m³/an ;

- une sous-réalisation de l'objectif de production apicole à hauteur de 2,6 %. La production apicole obtenue est de 11 593 Kg/an. Ce niveau de production assure une rente apicole moyenne de l'ordre 430 DH/ruche/an, soit un revenu moyen annuel de 4300 DH/exploitation/an ;

- une sur-réalisation de l'objectif de sémentation à hauteur de 5,4 %. La production annuelle de sédiments s'élève à 2 742 tonnes/an, ce qui correspond à un taux moyen d'érosion de l'ordre de 0,85 tonnes/ha/an. Cependant le niveau optimal fixé au niveau de la fonction objectif est de 0,81 tonnes/ha/an ;

- le droit de parcours dans les forêts du bassin versant est garanti ;

- la structure irrégulière des forêts est convertie en une structure régulière à la fin de l'horizon de planification ;

- les fluctuations des volumes périodiques de bois et de liège varient entre -3,8 % et +2,8 % du volume périodique moyen qui est de 48 234 m³ (Cf. Fig. 4).

Evolution de l'utilisation de l'espace dans la forêt du BVMB

Le modèle d'aménagement multi-objectif élaboré a généré une solution « compromis » qui permet d'atteindre simultanément et au maximum les trois objectifs de l'aménagement considérés. L'évolution de l'utilisation de l'espace dans la forêt du bassin versant,

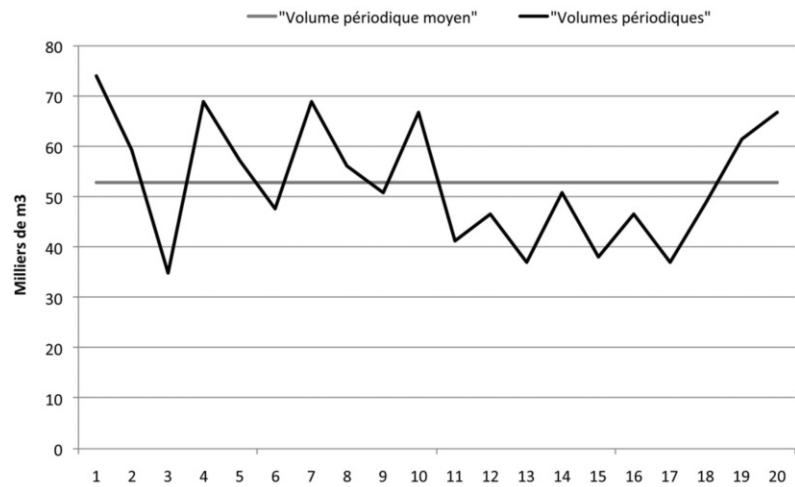


Fig. 3 :

Fluctuations des volumes périodiques par périodes (années) - Effet de toutes les contraintes.

Modalités d'obtention du graphique : voir les valeurs des volumes périodiques obtenus pour le modèle linéaire consignées au niveau du tableau XVII.

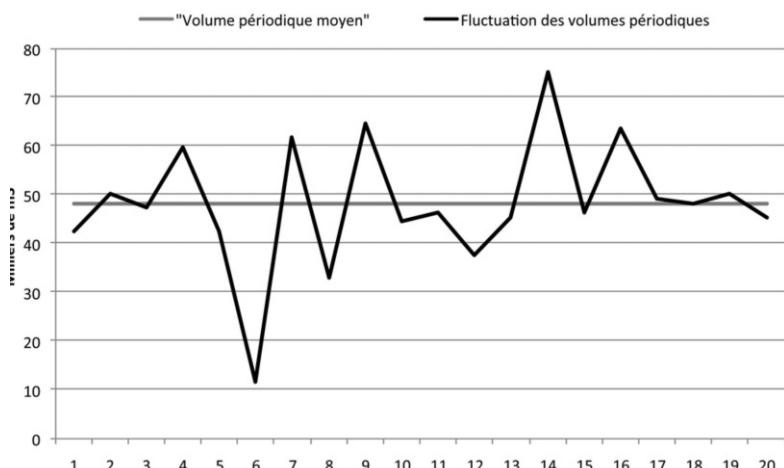


Fig. 4 :

Fluctuation des volumes périodiques de bois et de liège par périodes (années)

Modalités d'obtention du graphique : voir les valeurs des volumes périodiques obtenus pour le modèle linéaire consignées au niveau du tableau XVII.

Occupation de sol	Occupation actuelle ha	Occupation actuelle %	Occupation proposée ha	Occupation proposée %
Chêne-liège	574	17,9	2083	64,9
Matorral	2140	66,7	7	0,2
Pin maritime	41	1,2	367	11,4
Pin radiata	349	10,8	539	16,8
Pin d'Alep	104	3,2	212	6,6
Total	3209	100	3209	100

Tab. XVI :

Evolution de l'utilisation de l'espace de la forêt du bassin versant Moulay Bouchta.

préconisée par cette solution « compromis » est présentée dans le tableau XVI.

Analyse :

A partir du tableau XVI on constate que la solution du modèle d'aménagement multi-objectif conduit à une augmentation de l'occupation de la forêt naturelle de chêne-liège, qui occupera 2083 ha. Cette expansion s'est faite au dépend du matorral, seulement 7 ha sont conservés de cette occupation.

L'importance accordée par le modèle à la forêt naturelle de chêne-liège est expliquée par le rôle important de cette dernière dans la protection du sol contre l'érosion, ainsi que par sa meilleure contribution aux objectifs de productions ligneuse et apicole.

Par ailleurs, le chêne-liège est l'essence endémique du pourtour méditerranéen, il existe à l'état naturel au niveau du bassin versant objet de notre étude, et l'augmentation de sa surface ne pose pas de contraintes pédologiques ni situationnelles.

Les différents modes de traitement appliqués au chêne-liège au Maroc sont : la futaie régulière, la futaie régulière sur souches, et le taillis simple.

Pour la futaie régulière le produit principal est le liège de reproduction, la régénération est assurée soit par coupes progressives, soit par coupe unique.

Pour la futaie régulière sur souches, le produit principal est toujours le liège de reproduction. Si la régénération par semence est absente ou tout au moins déficiente, il faut faire appel aux rejets de souches. La faculté de rejeter de souche du chêne-liège se maintient à un âge avancé, ce qui permet de lui

appliquer le mode de traitement en futaie régulière sur souche.

Concernant le taillis simple, le produit principal de ce mode de traitement est le liège mâle. Dès lors, il devient inutile de maintenir longtemps les chênes-lièges puisque la régénération se fait par rejets.

L'augmentation des surfaces artificielles de pins, accordée par le modèle, est justifiée par leurs apports en bois et leurs rôles de protection des sols contre l'érosion. Les pins maritimes, d'Alep et radiata sont des espèces qui se développent parfaitement au niveau du pourtour méditerranéen et surtout au niveau de la zone du Rif dont le bassin versant objet de notre étude fait partie.

Pour le pin d'Alep, seul le régime de la futaie est appliqué à cette essence, la régénération peut se réaliser par coupe unique, par coupes progressives ou par régénération des peuplements artificiels.

Concernant le pin maritime au Maroc, la futaie régulière lui convient parfaitement, la régénération peut être envisagée par coupe unique ou par coupes progressives.

Quant au pin radiata, le régime convenable au Maroc est la futaie régulière, les traitements sylvicoles préconisés pour cette essence depuis la plantation jusqu'à l'âge d'exploitabilité sont : les élagages, les éclaircies et la coupe rase.

La régression de l'occupation du matorral est expliquée par sa faible contribution aux objectifs de production ligneuse, malgré son potentiel apicole assez important et sa bonne protection contre l'érosion. Cette régression est expliquée par la faible contribution de cette occupation pour le premier objectif de production en bois et liège.

Contrainte :

La contrainte principale qui se pose à l'application de la solution du modèle de programmation linéaire par objectif est d'ordre financier. Sachant que la régénération d'un hectare en chêne-liège coûte au Service forestier marocain 10 000 DH/ha alors que la reboisement par des espèces artificielles tels que le pin d'Alep ou le pin radiata coûte 5 000 DH/ha. Mais le Service forestier a fait un choix stratégique d'opter pour des essences endémiques pour réhabiliter les écosystèmes naturels (HCEFLCD).

Conduites sylvicoles de la forêt objet de l'aménagement (Cf. encadré ci-contre) :

La résolution du modèle d'aménagement multi-objectif permet de déterminer la

Photo 4 (ci-dessous) :

Phénomène d'érosion au niveau du bassin versant

Moulay Bouchta.

Photo T. EL MAADIDI.



Conduites sylvicoles de la forêt objet de l'aménagement

* La quatrième séquence d'aménagement a été retenue pour le pin maritime.

L'âge moyen de ce peuplement est de 36 ans. L'itinéraire sylvicole proposé comporte :

- coupe finale dans la deuxième période de planification à un âge de 40 ans et plantation immédiate ;
- premier élagage entre 3 et 6 ans et deuxième élagage à l'âge de 9 ans ;
- première éclaircie à l'âge de 15 ans, deuxième éclaircie à l'âge de 20 ans et troisième éclaircie à l'âge de 25 ans ;
- coupe finale dans la onzième période de planification à un âge de 45 ans et plantation immédiate ;
- premier élagage entre 3 et 6 ans et deuxième élagage à l'âge de 9 ans ;
- première éclaircie à un âge de 15 ans, deuxième éclaircie à l'âge de 20 ans et troisième à l'âge de 25 ans ;
- coupe finale dans la vingtième période de planification à un âge de 45 ans et plantation immédiate.

* La quatrième séquence d'aménagement a été retenue pour le pin radiata.

L'âge moyen de ce peuplement est de 35 ans. La conduite sylvicole proposée comporte :

- coupe finale pendant la première période de planification à un âge de 35 ans et plantation immédiate ;
- premier élagage à l'âge de 6 ans et deuxième élagage à l'âge de 12 ans ;
- première éclaircie à l'âge de 15 ans ;
- troisième élagage à l'âge de 15 ans ;
- deuxième éclaircie à l'âge de 20 ans et troisième éclaircie à l'âge de 25 ans ;
- coupe finale pendant la huitième période de planification à un âge de 35 ans et plantation immédiate ;
- premier élagage à l'âge de 6 ans et deuxième élagage à l'âge de 12 ans ;
- première éclaircie à l'âge de 15 ans ;
- troisième élagage à l'âge de 15 ans ;
- deuxième éclaircie à l'âge de 20 ans et troisième éclaircie à l'âge de 25 ans ;
- coupe finale pendant la quinzième période de planification à un âge de 40 ans et plantation immédiate ;
- premier élagage à l'âge de 6 ans et deuxième élagage à l'âge de 12 ans ;
- première éclaircie à l'âge de 15 ans ;
- troisième élagage à l'âge de 15 ans et deuxième éclaircie à l'âge de 20 ans.

* La neuvième séquence d'aménagement a été retenue pour le pin d'Alep.

L'âge moyen de ce peuplement est de 35 ans. L'itinéraire sylvicole proposé comporte :

- coupe finale pendant la sixième période de planification à un âge de 60 ans et plantation immédiate ;
- première éclaircie à l'âge de 20 ans, deuxième éclaircie à l'âge de 24 ans et troisième à l'âge de 30 ans ;
- coupe finale pendant la seizième période de planification à un âge de 50 ans et plantation immédiate ;
- première éclaircie à l'âge de 20 ans deuxième éclaircie à l'âge de 24 ans.

La première séquence d'aménagement a été retenue pour la jeune subéraie. L'âge moyen de ce peuplement est de 25 ans. La conduite sylvicole proposée comporte :

- récoltes du liège de reproduction et débroussaillements (récolte d'arbousier, souches d'Erica, broussailles) aux âges de 30, 50, 60 et 70 ans ;
- coupe finale pendant la onzième période de planification à un âge de 75 ans ;
- récolte du liège mâle et débroussaillage (arbousier, souche d'Erica, broussaille) à l'âge de 20 ans ;
- récoltes du liège de reproduction et débroussaillements (récolte d'arbousier, souches d'Erica, broussailles) aux âges de 30 et 40 ans.

* La deuxième séquence d'aménagement a été retenue pour la suberaie adulte.

L'âge moyen de ce peuplement est de 55 ans. La conduite sylvicole proposée comporte :

- récoltes du liège de reproduction et débroussaillements (récolte d'arbousier, souches d'Erica, broussailles) aux âges de 60 ans, 70 ans ;
- coupe finale pendant la cinquième période de planification à l'âge de 75 ans ;
- récolte du liège mâle et débroussaillage (arbousier, souche d'Erica, broussaille) à l'âge de 20 ans ;
- récoltes du liège de reproduction et débroussaillements (récolte d'arbousier, souches d'Erica, broussailles) aux âges de 30, 40, 50, 60 et 70 ans.

* La dix-septième séquence d'aménagement a été retenue pour la suberaie adulte.

L'âge moyen de ce peuplement est de 85 ans. La conduite sylvicole proposée comporte :

- récoltes du liège de reproduction et débroussaillements (récolte d'arbousier, souches d'Erica, broussailles) aux âges de 90 et 100 ans ;
- coupe finale pendant la troisième période de planification à un âge de 75 ans ;
- récolte du liège mâle et débroussaillage (arbousier, souche d'Erica, broussaille) à l'âge de 20 ans,
- récoltes du liège de reproduction et débroussaillements (récolte d'arbousier, souches d'Erica, broussailles) aux âges de 40, 50, 60 et 70 ans.

Périodes de 5 ans	Objectif de production ligneuse	
	Volume (m ³)	%
1	74027,70	7
2	59222,16	5,6
3	34898,77	3,3
4	68740,01	6,5
5	57107,08	5,4
6	47589,23	4,5
7	68740,01	6,5
8	56049,54	5,3
9	50761,85	4,8
10	66624,93	6,3
11	41244,00	3,9
12	46531,70	4,4
13	37013,85	3,5
14	50761,85	4,8
15	38071,39	3,6
16	46531,70	4,4
17	37013,85	3,5
18	48646,77	4,6
19	61337,24	5,8
20	66624,93	6,3
Total	1057538,64	100

Tab. XVII :
Fluctuations des volumes périodiques - Modèle avec toutes les contraintes.

conduite sylvicole la plus appropriée. Cette dernière émane de l'analyse de la meilleure séquence d'aménagement pour chaque type de peuplement.

Conclusion

L'objectif de cette étude a consisté à concevoir une approche permettant de conduire un aménagement intégré de la forêt du bassin versant Moulay Bouchta, basé sur les principes de l'utilisation multiple des ressources naturelles.

Les trois objectifs d'aménagement ont été considérés avec le même poids sur un horizon de planification de 100 ans. La solution « compromis » du modèle multi-objectif a préconisé une augmentation de l'occupation de la forêt naturelle de chêne-liège à hauteur de 1509 ha, vue sa forte contribution pour les trois objectifs de l'aménagement considérés. Le taux de sédimentation moyen est de 0,85 tonnes/ha/an.

Le droit de parcours dans les forêts du bassin versant a été garanti. La structure irrégulière des forêts est convertie en une structure régulière à la fin de l'horizon de planification.

La solution « compromis » du modèle multi-objectif a démontré l'importance de la forêt naturelle pour la production de bois, de liège et de miel, ainsi que son rôle primordial dans la protection du sol contre l'érosion.

Finalement, on peut dire qu'au cours des prochaines années on pourra s'attendre à un recours de plus en plus fréquent à l'approche basée sur la programmation linéaire en ce qui concerne les problèmes de décision en gestion forestière. La régionalisation des décisions et le désir par la population de participer au processus décisionnel sont autant de facteur propice au développement de cette tendance.

Période	Production ligneuse	
	Production (m ³)	Fluctuations (%)
1	42542,67	-0,59
2	50163,70	0,2
3	47366,11	-0,09
4	59810,57	1,2
5	42542,67	-0,59
6	11672,70	-3,79
7	61739,94	1,4
8	32895,81	-1,59
9	64634,01	1,7
10	44472,05	-0,39
11	46401,42	-0,19
12	37719,24	-1,09
13	45436,73	-0,29
14	75245,55	2,8
15	46401,42	-0,19
16	63669,31	1,6
17	49102,54	0,09
18	48234,33	0
19	50163,70	0,2
20	45436,73	-0,29
Total	964686,74	****
Achèvement	****	-8,8%

Tab. XVIII :
Solution du modèle de la programmation par objectif - Modèle à objectifs de poids égaux.

Références bibliographiques

- Buttoud et Yunusova, 2002. A mixed model for formulation of a multipurpose mountain forest policy. Theory Vs practice on the example of Kyrgyzstan. *Forest policy and Economics* 4,149-160
- Dubourdieu, 1997. *Manuel d'aménagement forestier-gestion durable et intégrée des écosystèmes forestiers*. Tec et Doc Lavoisier.Paris.
- FAO, 1997. Ouvrage sur l'aménagement durable des forêts, Etude FAO Forêts, FAO Rome.
- HCEFLCD 2012. Etude d'inventaire des pérимètres de reboisement au niveau de la zone du Rif du Maroc.
- HCEFLCD 2010. Etude sur l'érosion et l'évaluation des pertes en sols sous différents couverts végétal relevant de la zone du Rif.
- HLAL E., 1988. Goal Programming multi-objective forest management an application to the Cedar Forest of Morocco. A thesis submitted to the faculty of the Institute Agronomic and Veterinary Hassan II.
- Marghadi S., 2009. Intégration des méthodes d'aide à la décision dans l'aménagement multifonctionnel des forêts au Maroc, thèse de docto- riat, aménagement du territoire, Université Catholique de Louvain Belgique.
- Menana., 2005. Socioéconomie des systèmes d'exploitation des ressources naturelles dans le bassin versant Moulay Bouchta, thèse doctoral en cours. « Faculté des sciences de rabat ».
- Mitchelle, 2004. Operational forest harvest scheduling optimization: a mathematical model and solution strategy. Phd Thesis, University of Auckland.
- Wang, 2004. One hundred faces of sustainable forest management *Forest Policy and Economics* 6, 205-213.



Tayeb EL MAADIDI

Ingénieur en Chef des Eaux et Forêts, Haut-Commissariat des Eaux et Forêts et de la Lutte contre la Désertification à Rabat au Maroc
Doctorant d'Etat à l'Université Mohammed V à Agdal Faculté des sciences de Rabat
Mél : Tayebmaadidi@gmail.com
Tél. : 00(212)661938982

Photo 5 (ci-dessus) :
Agriculture au niveau du bassin versant Moulay Bouchta.

Photo T. EL MAADIDI.

Ahmed EL ABOUDI

Professeur de l'enseignement supérieur
Faculté des sciences de Rabat - Département :
Gestion et Economie des Ressources de l'Environnement.
Université Mohamed V, Rabat Agdal, Maroc
Mél : elaboudi@gmail.com Tél. : 00(212)661289933

El Aïd HLAL

Phd, M.S. professeur de l'enseignement supérieur.
Ecole Nationale Forestière des Ingénier de Salé, Maroc, département :
Gestion et Economie des Ressources de l'Environnement.
Mél : hlalelaid@yahoo.fr Tél. : 00(212)661228996

Résumé

Programmation linéaire par objectif pour l'aménagement forestier au Maroc (cas du bassin versant de Moulay Bouchta)

La présente étude a concerné la forêt du bassin versant Moulay Bouchta d'une superficie de 7664 ha. Elle consiste à un cadre analytique permettant de conduire un aménagement intégré en utilisant une des méthodes multicritères d'aide à la décision.

L'aménagement de la forêt du bassin versant doit répondre à trois préoccupations à savoir : la maximisation de la production ligneuse, la maximisation de la production apicole et la minimisation de la sédimentation à l'aval du bassin versant.

Pour atteindre simultanément ces trois objectifs de l'aménagement, la programmation linéaire par l'objectif a été appliquée grâce à sa capacité à considérer plusieurs objectifs à la fois.

Les niveaux optimums à atteindre sont les solutions optimales des modèles de programmation linéaire en considérant chaque fois un seul objectif d'aménagement. Ces niveaux optima sont : 10 575 m³/an de bois et de liège pour le premier objectif, 11 902 Kg/an en miel pour le deuxième objectif, et 2600 tonnes/an en sédiments à partir de toute la forêt pour le troisième objectif.

Les trois objectifs d'aménagement ont été considérés avec le même poids sur un horizon de planification de 100 ans. La solution « compromis » du modèle multi-objectif a préconisé une augmentation de l'occupation de la forêt naturelle du chêne-liège à hauteur de 263 %, vue sa forte contribution aux trois objectifs recherchés. Le taux de sédimentation moyen à l'issue de la mise en œuvre de cette solution serait de l'ordre de 0,85 tonnes/ha/an.

Summary

Goal-based linear programming for forest management in Morocco (case of Moulay Bouchta catchment area)

The study aims to provide an analytical framework for implementing multipurpose management in the forests of the Moulay Bouchta catchment area using one of the various multi-factorial aids to decision-making.

The forests of the catchment area, located in Morocco's Western Rif, cover 7,664 hectares. Development of these forests must take into account three objectives: the maximising of both wood and honey production and the minimising of sedimentation downstream of the catchment area in a projected dam.

The method used was goal-based linear programming which is considered among the main multi-factorial analytical methods. Linear programming was chosen due to its ability to handle complex systems. The optimal targets to be reached simultaneously within the one overall objective correspond to the optimal linear model solutions, i.e. 10,575 m³/year for wood and cork; 11,902 kilograms/year of honey; and 2,600 tons/year of sediment for the entire Moulay Bouchta forest.

The « compromise »solution of the goal-based linear programming model for a 100 year period foresees an increase in area of the natural cork oak forests of 263 %: they make a major contribution to each of the three objectives, increasing wood, cork, and honey production while minimising sedimentation to 0.85 ton/hectare/year.

Resumen

Programación lineal por objetivos para la ordenación forestal en Marruecos (el caso de la cuenca hidrográfica de Moulay Bouchta)

El presente estudio afecta al bosque de la cuenca de Moulay Bouchta (Marruecos) con una superficie de 7.664 ha. Consiste en un marco analítico que permite realizar una ordenación integrada utilizando uno de los métodos multicriterios de ayuda a la toma de decisiones.

La ordenación forestal de la cuenca debe responder a tres problemas previos : la maximización de la producción leñosa, la maximización de la producción apícola y la minimización de la sedimentación en el curso inferior de la cuenca.

Para alcanzar simultáneamente estos tres objetivos de la ordenación, se ha aplicado la programación lineal gracias a su capacidad de considerar varios objetivos a la vez.

Los niveles óptimos a alcanzar son las soluciones óptimas de los modelos de programación lineal considerando cada vez un solo objetivo de ordenación. Estos niveles óptimos son : 10.575 m³/año de madera y corcho para el primer objetivo, 11.902 Kg/año de miel para el segundo objetivo y 2.600 toneladas/año en sedimentos de todo el bosque para el tercer objetivo.

Los tres objetivos de la ordenación se han considerado con el mismo peso en la planificación a 100 años. La solución « compromiso » del modelo multi-objetivo promueve un aumento de la ocupación de los alcornocales al 263%, en vista a su aportación a los tres objetivos buscados. La tasa de sedimentación media resultante de la puesta en marcha de esta solución será del orden de 0,85 toneladas/ha/año.