ÉVALUATION À L'AIDE D'UN SYSTÈME D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE DES FLUX DE BOIS TRANSITANT SUR LA VOIRIE FORESTIÈRE. Application à l'entretien des routes et à l'évaluation des coûts de mobilisation des bois

MURIÈLE MILLOT - FABRICE TORRE - SYLVAIN LABBÉ

La desserte forestière, sa conception et son entretien sont des éléments clés de la réflexion sur la gestion forestière. Or, en France, nous manquons singulièrement d'outils informatiques pour aider le forestier à simuler ou à quantifier les décisions d'équipement qu'il prend. Si les calculs d'amortissement de l'investissement sont assez bien maîtrisés, le coût des dégradations que le transit de volume de bois supplémentaire peut engendrer sur le réseau sur lequel le tronçon de route ou de piste créé se greffe est souvent négligé. Pourtant, toute nouvelle piste est raccordée à une route forestière, elle-même raccordée à une autre route, qu'elle soit forestière, communale ou départementale. Les conséquences de la mobilisation supplémentaire de bois qui découle de ces créations sur le réseau aval sont peu ou pas anticipées, sauf en cas de conflit ouvert avec les propriétaires des terrains traversés.

C'est ainsi que, pour quantifier simplement des flux de bois à partir de données habituellement à disposition des gestionnaires forestiers, nous avons décidé d'explorer les capacités des outils géomatiques existants. Notre travail est donc articulé autour de deux aspects principaux : une recherche sur système d'information géographique (SIG) et une étude sur les liens entre bois transportés et entretien de la voirie. Suite à la proposition de Fabrice Torre, alors en poste à la Direction départementale de l'Agriculture et de la Forêt de Haute-Corse, nous avons opté pour le massif du Niolo comme site d'étude. En avançant dans nos travaux, nous avons découvert la possibilité d'établir automatiquement des cartes de coûts d'exploitation et de calculer des itinéraires optimaux de sortie des bois. Nous avons donc utilisé cette opportunité.

L'exposé de ces recherches est organisé en trois parties. Tout d'abord, nous présenterons le massif du Niolo, la gestion forestière qui y est réalisée et l'organisation de l'exploitation forestière dans cette zone. Puis, nous ferons rapidement le point sur les liens entre trafic et entretien de la voirie. Enfin, nous expliciterons les processus géomatiques, utilisés pour quantifier les flux de bois, la dégradation liée au trafic et les coûts d'exploitation sur l'ensemble du massif.

LE MASSIF DU NIOLO

Le massif du Niolo est situé au cœur de la Corse, entre Corte et le col de Verghio, limite départementale entre la Haute-Corse et la Corse-du-Sud (figure 1, p. 126).

Il correspond au bassin versant drainé par le torrent du Golo et ses affluents. Il couvre une surface de 6 800 km² où alternent zones ouvertes et espaces boisés. Massif montagneux, situé dans le Parc naturel régional Corse, ses altitudes s'échelonnent de 345 m à Ponte Castirla à 2 706 m au sommet du Monte Cinto.

Les formations végétales dominantes sont les landes et pelouses alpines ainsi que les formations pastorales de montagne qui couvrent environ 645 000 ha. S'y ajoutent 17 500 ha de terrains nus et 18 000 ha de terrains forestiers comprenant les maquis.

FIGURE 1
CARTE DE LOCALISATION DU MASSIF DU NIOLO

Les forêts du Niolo

• La propriété forestière

La propriété forestière du massif se répartit en :

- deux forêts de la collectivité territoriale (FT) de Corse, Tavignano-Melo et Valdoniello, pour 6 300 ha,
- quatre forêts communales, Albertacce, Calacuccia, Casamaccioli et Corscia pour 6 200 ha,
- et une multitude de propriétaires privés pour 2 700 ha.

FIGURE 2
LA PROPRIÉTÉ FORESTIÈRE DANS LE MASSIF DU NIOLO

• *Les peuplements forestiers de production*

Dans cette étude, nous nous intéressons au volume de bois à exploiter, donc aux peuplements susceptibles d'avoir un minimum de mètres cubes sur pied. Nous avons fixé comme limite inférieure 50 m³/ha. Les peuplements sélectionnés, sur la base des données de l'IFN (mission sur le terrain 1988), sont présentés dans le tableau I (ci-dessous) par importance décroissante.

FIGURE 3

LES PEUPELEMENTS DONT LE VOLUME SUR PIED EST SUPÉRIEUR OU ÉGAL À 50 M³/HA

TABLEAU I

Surfaces des principaux types de peuplements forestiers du massif du Niolo

Type de peuplement	Surface en hectare	Volume total (m ³ /ha)	
		Soumis	Non soumis
Futaie de Pin laricio	5 907	350	250
Boisement morcelé de Châtaignier.....	499	150	225
Taillis	412	50	70
Futaie de Hêtre	264	250	400
Futaie de Pin maritime	119	200	550
Autre boisement morcelé.....	83	100	150
Futaie de Pin mélangée à du taillis.....	57	175	100
Futaie de Chêne vert	38	150	100
Total.....	7 379		

Le traitement majoritaire en forêt publique est la futaie régulière par parquets adaptée au tempérament du Pin laricio. Les volumes prélevés proviennent principalement des parcelles en régénération. Devant les difficultés insulaires de commercialisation des bois, les forestiers ont donné la priorité au renouvellement des peuplements les plus anciens, quitte à sacrifier un peu les groupes d'amélioration et plus particulièrement les interventions en éclaircies dans les diamètres inférieurs à 35 cm. La gestion se cantonne aux parcelles desservies. Ainsi, la forêt communale de Corscia, environ 1 200 ha, n'est pas aménagée du fait de l'absence de voirie.

FIGURE 4
LA VOIRIE DANS LE MASSIF DU NIOLO

TABEAU II **Longueur et densité de la voirie dans le massif du Niole**

Nature de la voirie	Massif du Niole	FT Valdoniello 2 161 ha	FT Tavigniano 585 ha	FC Albertacce 666 ha	FC Calacuccia 48 ha	FC Casamaccioli 512 ha	FC Corscia 465 ha	Forêt privée 2 156 ha	Hors forêt
Longueur de la voirie en km									
Voiries publiques	93,3	0	0	0	0	0	0	0,4	92,9
Voirie agricole	53,2	0	0	0	0	0	0	2,4	50,8
Route forestière	81,6	28,0	11,8	13,2	5,4	8,0	0	2,5	12,7
Piste	28,5	12,4	0	5,6	0	2,6	0	6,2	1,7
Densité de la voirie en km/100 ha									
Route forestière		1,3 2,0*	2,0	2,0	11,2	1,6	0	0,1 0,4	
Piste		0,6	0	0,8	0	0,5	0	0,3	

* si l'on intègre la longueur de chemin départemental.

La desserte

La Corse est l'île la plus boisée de la Méditerranée mais, pendant des années, l'exploitation des bois s'est trouvée limitée par son relief aux vallées encaissées. Les premiers bois de grandes longueurs, profitant de la création de la route Bastia-Ajaccio, n'arrivent à Ajaccio qu'en 1812 (Bourcet, 1996). Dans son article, Jean Bourcet rappelle que « *Les exploitants ne soumissionnent pas aux adjudications à long terme pour les forêts de Lindinosa, Aitone et Valdunielu (...) en 1848 et 1849. (...) Les difficultés de débardage liées au relief, les violences (...) tenant à l'agitation politique du pays ont conduit à interrompre bien des exploitations lorsque celles-ci ont effectivement débuté* ». En 1852, un décret ordonne la création de routes forestières qui relieraient les massifs forestiers domaniaux aux lieux de consommation et aux ports d'embarquement. La route forestière desservant le massif du Niolo et la forêt d'Aitone, d'une longueur de 86,8 km, était prévue en 9^e priorité pour ce programme de construction qui devait s'étaler de 1854 à 1884. Déjà à l'époque, la création de tels ouvrages était très déficitaire et les recettes domaniales n'ont couvert que 28 % des dépenses d'équipement. Ce réseau structurant est maintenant converti en voirie départementale très fréquentée par les touristes. Une deuxième grande étape de construction s'est étalée de 1973 à 1993, bénéficiant de la modernisation des travaux de terrassement. 732 km de desserte supplémentaire sont réalisés en forêt publique dont près de la moitié en forêt communale. Ce programme a été fortement motivé par les problèmes d'incendie de forêt et une volonté d'aménagement et de gestion des forêts et rendu possible par l'apport de crédits FEOGA et PIM.

Le tableau II (p. 128) récapitule les kilomètres de routes et de pistes en forêt rapportés à la surface des peuplements dont le volume sur pied est supérieur à 50 m³/ha.

Comme partout en France, la desserte des forêts relevant du régime forestier contraste fortement avec celle de la forêt privée. La grande faiblesse en équipement de pistes pérennes quelle que soit la nature de la propriété est remarquable. L'exploitation se fait par ouverture de chemin de débardage, en fonction des coupes, par les entrepreneurs de travaux forestiers. Ces sillons souvent faits selon la ligne de plus grande pente ne peuvent servir qu'une fois.

L'ensemble des routes forestières se raccorde au chemin départemental 84 et la majorité des bois rejoint ensuite la route nationale 193 reliant Bastia à Ajaccio. La plupart des grumiers passent donc dans la Scala di Santa Régina, sur un tronçon du CD 84, taillé dans la roche, surplombant le Golo.

La filière-bois

On dénombre actuellement moins de 10 scieries sur l'ensemble de la région corse auxquelles s'ajoute une dizaine de négociants en bois. Ces chiffres sont faibles, rapportés aux 250 000 ha de forêts. L'absence d'unité de transformation entraîne la mévente des bois de diamètre inférieur à 35. Il existe une chaufferie au bois à Corte, à une heure de route (Budet et Mundler, 1995). Une convention pluriannuelle est en cours pour l'exploitation des éclaircies résineuses, la ressource en Eucalyptus essentiellement utilisée étant limitée.

À la grande vente de l'automne 2002, seuls quatre acheteurs ont acquis des lots dans le massif du Niolo. Luciani, un négociant qui exporte les meilleures qualités vers l'Italie, a acheté la moitié des 6 150 m³ vendus. Les scieries Pomi de Santa Maria Sicche, Muffragi d'Afa et Zucarelli de Corte se sont portées acquéreurs pour respectivement 1 375 m³, 1 050 m³ et 656 m³. Les prix au m³ s'évaluent de 49 € à 111 € à comparer au plus beau lot commercialisé à Vizzavona à 163 €. L'absence de concurrence sur les coupes de bois a de quoi décourager les gestionnaires de s'investir dans l'évaluation de barèmes de coûts d'exploitation. Soit la parcelle est desservie,

ou nécessite juste la création d'une traîne, et alors les bois sont vendus sur la base d'un montant d'exploitation standard de 15 €/m³, soit rien n'est fait.

Les forestiers sont donc confrontés à un marché du bois centré sur le bois d'œuvre, de Pin laricio essentiellement, dans les mains d'un petit nombre d'acheteurs locaux. Le climat politique de l'île n'encourage pas les négociants extérieurs. Sur la demande de l'association des communes forestières de Haute-Corse, l'ONF et l'ODARC (Office de Développement agricole et rural de la Corse) se sont impliqués dans le projet d'implantation d'un parc à grumes, mais il est loin d'avoir abouti.

Le massif du Niolo, pour toutes les raisons que nous venons d'évoquer, n'est peut-être pas le site d'étude idéal pour valoriser les capacités de simulation que nous avons développées. Nous n'avions pas réalisé que les contraintes pesant sur la filière-bois corse seraient si fortes. La méthode d'analyse que nous allons exposer maintenant sera d'autant plus valable, aux paramètres locaux près, que le contexte forestier sera plus traditionnel.

LIEN ENTRE TRAFIC ET ENTRETIEN

Définissons l'entretien dont il est ici question : l'entretien des chemins se décompose entre entretien courant et entretien périodique (EPFZ, 1991). Nous ne parlerons pas ici de l'entretien courant qui correspond à de petites interventions régulières comme le comblement de nid de poules, le dégagement de voies d'eau et l'entretien des abords. Pour résumer, il s'adresse à toutes les petites dégradations liées aux intempéries saisonnières. L'entretien périodique concerne des travaux plus importants et plus coûteux, comme le renouvellement de la couche de roulement, nécessitant le recours à des entreprises aux moyens mécaniques relativement importants. Ces travaux sont à renouveler tous les 5 à 10 ans en fonction de nombreux paramètres, comme la qualité de la voirie existante, le climat et le trafic. C'est cet aspect que nous allons aborder.

Il est couramment admis que l'entretien de la voirie, forestière ou non, est fonction du trafic qu'elle supporte. Lorsque l'on cherche à quantifier le lien entre trafic et entretien, on s'aperçoit que la relation n'est pas si claire et en tout cas pas linéaire. La planification de travaux se fait, au coup par coup, à partir d'auscultation et de typologies des désordres. C'est d'ailleurs cette approche que préconise Jacques Méry (1994) pour un diagnostic des besoins en entretien de la voirie forestière.

Depuis l'abandon de cette activité par le Cemagref, la recherche française dans le domaine de la voirie forestière s'est extrêmement raréfiée. Il y a très peu de littérature récente, postérieure à 1995, sur le sujet si l'on excepte le mémoire de troisième année de la FIF de Jean-Marc Auban (1996) sur l'entretien des routes forestières dans les Pyrénées et le document réalisé par l'ONF en 2000 intitulé "*Routes forestières : recommandations techniques*". Les derniers travaux et publications correspondent à des approches très pragmatiques, elles sont principalement basées sur la confrontation des propositions de normalisation des années 1970 aux réalités de terrain, au bout de plus de vingt années de pratique.

La connaissance du lien entre trafic et usure de la voirie permet d'une part de dimensionner au mieux les routes en fonction des surfaces qu'elles draineront et d'autre part d'évaluer la dégradation liée aux grumiers.

C'est à l'ONF (2000) que l'on doit la formulation la plus simple de la dégradation NE en fonction du nombre annuel d'essieux équivalents (à l'essieu de référence).

$$NE = C \times N$$

où C est un coefficient d'équivalence lié au type de grumier et à la nature de la chaussée selon les modalités présentées dans le tableau III ci-dessous ;

et N est le nombre annuel de camions.

TABLEAU III

	Camion de 2 essieux	Camion de 3 essieux	5/6 essieux et semi-remorque
Chaussée souple	C = 1	C = 0,5	C = 1,5
Chaussée rigide	C = 1	C = 2	C = 3

En cas de surcharge prévisible, il faut doubler la valeur de C pour les N véhicules correspondants.

La démarche à adopter serait donc la suivante :

- rechercher tout d'abord le profil type du grumier fréquentant le massif,
- déterminer la nature de la chaussée, souple ou rigide : déterminer C,
- estimer le volume moyen de bois (v) transporté par le grumier correspondant à la charge utile du véhicule,
- estimer le volume total V de bois exploité et transporté annuellement sur le réseau,
- déterminer le nombre annuel de grumiers $N = V/v$,

$$NE = C \times V/v$$

Nous avons bien conscience des limites de cette approche et cela pour plusieurs raisons. Plus que la charge des grumiers, c'est la surcharge qui est responsable des principaux dégâts. En effet, d'après le CRPF Bourgogne (1993), 20 % de surcharge double l'agressivité et 50 % la quintuple. Ce paramètre est particulièrement difficile à quantifier. Les caractéristiques techniques de la route ont un poids énorme dans son évolution. Ainsi Jean-Marc Auban estime que, pour les Pyrénées, les variables les plus discriminantes sont la pente en long, puis l'exposition, le facteur eau et le pourcentage de rocher lié à la géologie. En 1994, Jacques Méry soutenait que l'évaluation d'un réseau routier devait se faire à partir d'une auscultation visuelle suffisamment codifiée pour rester objective, mais assez simple pour que sa mise en œuvre soit effective sur le terrain. Ce principe est celui retenu par les forestiers suisses (Burlet, 1999) et par l'ONF.

Cependant, ces approches ne permettent que des prévisions au cas par cas, donc qu'une planification limitée dans l'espace et dans le temps. Ainsi, nous sommes très loin d'avoir les éléments pour une modélisation rigoureuse et absolue des entretiens à partir de la connaissance du trafic. Par contre, dans un contexte technique donné, nous pouvons évaluer les variations de dégradations en fonction des volumes mobilisés.

Conclusions pour le massif du Niolo

Nous avons cherché à appliquer la démarche détaillée précédemment au massif du Niolo. Les grumiers sont des semi-remorques à 3 + 2 essieux.

FIGURE 5
ENSEMBLE GRUMIER
TRADITIONNEL
POUR BOIS LONGS

(source : ARMEF *et al.*, 1993)

Les chaussées sont souples.

$$\text{Alors } C = 1,5$$

La charge en bois d'un grumier du Niolo, calculée à partir du poids total roulant autorisé, est de 30 tonnes (ARMEF *et al.*, 1993). La densité étant de 0,8 pour le Pin, un mètre cube de bois pèse 800 kg, donc $v = 30 / 0,8 = 37,5 \text{ m}^3$.

$$\text{D'où } NE = 1,5 \times V / 37,5 = 0,04 \quad V = V / 25$$

Il est alors possible de calculer et cartographier pour chaque cellule de route le NE (l'équivalent essieu circulant) donc le degré de dégradation et ainsi de simuler, en fonction de l'accroissement du volume mobilisé, l'augmentation de la dégradation.

ÉVALUATION DES FLUX DE BOIS TRANSITANT SUR LA VOIRIE FORESTIÈRE À L'AIDE D'UN SIG : APPLICATION À L'ENTRETIEN DES ROUTES FORESTIÈRES ET À L'ÉVALUATION DES COÛTS D'EXPLOITATION SUR UN MASSIF FORESTIER

Deux analyses sont menées en parallèle, d'une part le repérage cartographique des volumes qu'il est souhaitable de mobiliser pendant un pas de temps donné et d'autre part l'évaluation des surfaces techniquement exploitables à partir de la voirie existante⁽¹⁾. Ces informations sont ensuite croisées pour simuler l'arrivée des volumes sur les pistes, leur accumulation sur les places de dépôts au niveau des routes, puis le transport par grumiers en direction des scieries. Ensuite, une carte des coûts d'exploitation est construite à partir des barèmes de bûcheronnage et de débusquage établis pour cette étude. Nous allons développer ici une approche raster⁽²⁾ particulièrement bien adaptée pour calculer des variations de pente et utiliser des fonctions d'accumulations.

Préparation des couches d'information

- *Les volumes à mobiliser*

Dans un cas idéal, sur l'ensemble du territoire d'étude, les coupes à réaliser, ainsi que les volumes à récolter par qualité de bois et type d'essence, sont connus et repérés. Or, dans la pratique, c'est rarement le cas, surtout pour des schémas intercommunaux mélangeant forêts publiques et privées. Il faut donc souvent mener une double approche entre, d'une part, les forêts soumises et quelques forêts privées à plan simple de gestion où les besoins sont précis et exprimés, et d'autre part, la multitude de petites propriétés forestières privées. Pour ces dernières, il faut alors émettre des hypothèses sur la gestion souhaitable, ce qui revient schématiquement à repérer les peuplements de valeurs.

. Pour les forêts aménagées ou soumises à plan simple de gestion, à chaque polygone de peuplement sont affectées deux informations (champs de la table attributaire dans le SIG) : indiquant le volume à prélever dans un pas de temps choisi et le volume à prélever à l'hectare.

. Pour les autres forêts, par défaut il est possible d'utiliser les données de l'IFN avec toutes les incertitudes qu'il peut y avoir sur les volumes. Il faut dans un premier temps repérer les types de peuplement "productifs", puis calculer le volume à l'hectare et estimer le volume qui pourrait être mobilisé en un pas de temps donné.

(1) La démarche technique est détaillée dans le stage du Cemagref-UMR33 "Schémas de desserte forestière : conception, apport des SIG".

(2) En mode raster, les informations sont représentées sous forme d'une grille régulière de cellules (ou pixels). On l'oppose à l'approche vecteur qui représente les informations sous forme de points, lignes ou limites de polygones. Le mode raster permet des calculs de type matriciel et rend certaines simulations plus facilement réalisables par les logiciels utilisés.

Dans le massif du Niolo, pour les forêts publiques, les parcelles inscrites à l'état d'assiette des cinq prochaines années nous ont été communiquées par l'ONF sous forme d'un plan de repérage au 1/25 000 et d'un tableau indiquant les volumes à prélever par parcelle. En ce qui concerne la forêt privée, il n'y a pas de PSG. Nous avons donc travaillé à partir des peuplements sélectionnés à partir des données de l'IFN (cf. tableau I, p. 127). Nous avons émis l'hypothèse que, lorsqu'une desserte existe, 30 % du volume est extrait tous les dix ans, soit 15 % en cinq ans pour être homogène avec le soumis.

- *L'identification de la voirie et des exutoires*

Cette étape consiste à repérer, indépendamment de la dénomination officielle de la voirie, les tronçons que l'on peut considérer comme des pistes, c'est-à-dire à partir desquels un tracteur peut effectuer du débusquage et les routes sur lesquelles transitent les grumiers. Vu la localisation des principaux acheteurs nous pouvons affirmer que l'exutoire principal est la Scala de Santa Régina et donc ainsi orienter notre réseau vers ce seul point (la méthode présentée ici reste toutefois valable avec plusieurs exutoires).

- *Les critères d'exploitabilité*

Pour l'exploitation forestière, nous avons utilisé les paramètres simplifiés suivants adaptés au type de tracteurs utilisé en Corse :

- 1^{er} critère : Pour des raisons de sécurité, pas de bûcheronnage dans les peuplements situés sur des pentes supérieures à 100 %, donc pas d'exploitation.
- 2^e critère : Un tracteur peut pénétrer à 200 mètres maximum dans tout peuplement contigu à la piste forestière si la pente est inférieure à 40 %.
- 3^e critère : Le tracteur accepte un dévers de 10 % maximum.
- 4^e critère : Les zones accessibles par le câble du treuil situé à l'arrière du tracteur sont de 50 m en amont du tracteur et jusqu'à 70 m en aval.

Outre les parcelles forestières mobilisables et le réseau de pistes et de routes décrits au paragraphe précédent, la mise en œuvre de ces critères impose de disposer également, dans le SIG, du relief pour le calcul des pentes (en long, dévers) et des altitudes relatives (amont, aval).

Cette donnée est dénommée "*modèle numérique de terrain*" (MNT) et correspond à une grille régulière (raster) d'altitudes. Les logiciels SIG peuvent calculer ce MNT à partir de courbes de niveau, cette information peut aussi être acquise auprès de fournisseurs de données géographiques numériques.

L'évaluation des flux de bois et de la dégradation de la voirie

Les grandes étapes peuvent se résumer ainsi :

- *Préparation des couches d'informations :*

- . Rééchantillonnage des données sous format raster à la granularité souhaitée pour la précision du calcul (dans cet exemple on a choisi des cellules de taille 10 m par 10 m, chaque cellule est ensuite traitée de manière uniforme en termes de pente, distance au réseau, volume sur pied...).

- . Calcul à partir du MNT des plans dérivés pente et azimuth (direction de la ligne de plus grande pente) pour chacune des cellules.

- . Détermination des zones correspondant à l'accessibilité aux bûcherons (pente < 100 %) et au tracteur (pente < 40 %).

. Segmentation du réseau de voirie en deux classes : les voies à partir desquelles le tracteur peut débusquer qui seront appelées pistes et les routes (points exutoire pour les bois du massif).

• *Calcul de tous les points de l'espace pouvant être atteints par le câble d'un tracteur :*

. Affectation itérative, à chaque cellule de piste, des cellules de forêt accessibles par le tracteur depuis ce point. Le principe de ce calcul automatisé procède par itérations successives selon le schéma suivant :

— 1. Toutes les cellules de piste sont déclarées “accessibles” au tracteur, cela constitue un ensemble de départ de “cellules accessibles”,

— 2. On ajoute à l'ensemble des cellules accessibles la cellule contiguë à cet ensemble vérifiant les propriétés suivantes : c'est parmi les cellules restantes la plus proche des pistes, atteignable en vérifiant les conditions requises (moins de 40 % de pente longitudinale et de 10 % de pente transversale sur ce trajet, distance totale inférieure à 200 m),

— 3. Le processus 2 est répété tant qu'il reste des cellules répondant aux critères.

. À partir de l'ensemble des cellules accessibles au tracteur, calcul d'une zone tampon de 50 m de débusquage possible en amont comme en aval à partir du câble du tracteur, en suivant la même démarche itérative que pour les tracteurs.

. Évaluation de la pente au-delà des 50 m : si elle descend, on ajoute 20 m, sinon rien.

. Cette extension de 50 à 70 m exclut les cellules inaccessibles au bûcheron (pente > 100 %).

• *Évaluation des flux de bois débusqués jusqu'à chaque cellule de piste :*

. Le calcul précédent permet de connaître le volume de bois mobilisable pour chaque cellule, de plus il associe à chaque cellule un trajet de débusquage (distance, pente) jusqu'à la piste, et donc de calculer un coût de débusquage détaillé.

. Les bois récoltés sont ensuite accumulés jusqu'à chaque cellule de piste. Le processus permet de calculer ainsi un volume à débarker pour chaque cellule de piste.

FIGURE 6
ARRIVÉE DES BOIS DÉBUSQUÉS

- Pistes
- Routes secondaires
- Route principale
- Bois débusqués

- *Évaluation des volumes de bois débardés jusqu'à chaque cellule de route :*

. Pour débarder les bois vers les routes, le même algorithme est utilisé : les cellules de routes forment un ensemble accessible auquel sont agrégées les cellules de piste par ordre de coût croissant (le coût peut être simplement la distance à la route, ou une approche plus précise tenant compte de la viabilité de chaque cellule de piste).

. Le résultat conduit à connaître pour chaque cellule de piste le trajet jusqu'à la route et le coût correspondant, il suffit ensuite d'affecter ce coût à chaque volume de bois débusqué pour déterminer le coût total de débardage.

- *Évaluation des volumes de bois transitant par les routes :*

. Le même principe est à nouveau appliqué, l'ensemble des cellules accessibles constituent les exutoires considérés du réseau routier (scierie, parc à grumes, port...) et les volumes de bois sont ramenés à ces exutoires selon le chemin le plus court.

Cette méthode s'appuie sur une surface de coûts : pour chaque cellule, on affecte un coût de transport d'une unité de bois, que ce soit dans la parcelle, le long d'une piste ou d'une route. Ces coûts peuvent être affinés par l'utilisateur cellule par cellule selon des règles globales (par exemple le débardage le long de cette piste revient à tel coût fixe par kilomètre) et selon des critères dépendant du terrain (par exemple adapter le coût du débusquage selon la pente de chaque cellule traversée). Le calcul de ces plans pour l'exemple du massif du Niolo est détaillé au paragraphe "Cartes des coûts d'exploitation sur le massif du Niolo" (p.136).

La méthode évalue pour chaque cellule récoltée le trajet jusqu'à un exutoire final, et ainsi le coût total de mobilisation du bois pour chaque cellule, ce calcul détermine également le volume total de bois qui transitera sur chaque cellule des parcelles, puis par chaque point des pistes et des routes.

Le processus "*d'accumulation*" sur une "*surface de coût*" mis en œuvre trois fois de suite (parcelle, pistes puis routes) est une fonction couramment disponible dans les SIG raster.

- *Évaluation de la dégradation liée au trafic*

. Une fois connu le volume de bois passant en un point donné, il suffit d'appliquer la formule développée au paragraphe "Lien entre trafic et entretien" (p. 132) :

$$NE = 1,5 \times V / 37,5 = 0,04 V = V / 25.$$

FIGURE 8
TRANSIT DES BOIS SUR LES ROUTES

Augmentation de la dégradation des routes en fonction du nombre de passages des grumiers

Il faut rester prudent sur les résultats bruts issus des calculs de flux, car il ne faut pas oublier que les volumes exploités en forêts privées ont été estimés à partir du volume moyen à l'hectare par type de peuplement IFN sur la Haute-Corse. Cependant, l'ordre de grandeur doit logiquement être respecté. En utilisant nos différents critères, il passerait, par la Scala di Santa Régina, 44 500 m³ en cinq ans soit 8 900 m³/an. Ce chiffre est cohérent avec les 6 150 m³ de Pin laricio vendus en forêt publique à l'automne auxquels il faudrait ajouter les résultats des autres ventes et les récoltes en forêts privées.

Pour connaître l'impact de la création d'une desserte supplémentaire sur la voirie aval, il suffit de relancer les calculs sur la nouvelle couverture de routes et pistes et de comparer le nouveau plan de dégradation obtenu avec l'ancien. De même, pour la gestion des points noirs, les nouveaux volumes passant à chaque point seront recalculés automatiquement.

Carte des coûts d'exploitation sur le massif du Niolo

Il est possible de réaliser une carte des coûts d'exploitation sur un massif pour peu qu'il existe des barèmes d'exploitabilité basés sur des grandeurs connues, comme les volumes par hectare, la pente, la distance à la piste, etc. Ainsi, pour chaque cellule de 10 x 10 m de peuplement, il est possible de connaître le coût de bûcheronnage, de débusquage et de débardage par mètre cube de bois. Pour le Niolo, en l'absence d'un barème local, nous avons tenté le chiffrage suivant à partir de l'expérience de terrain de Fabrice Torre et des types de tracteurs utilisés au niveau local.

Les grandes étapes peuvent se résumer en :

- création d'une carte des classes de pente avec pour seuils 40, 70 et 100 et d'une carte des distances avec pour seuils 70 et 150,

TABLEAU IV

Barème d'exploitation élaboré avec Fabrice Torre

Pente en %	Coût de bûcheronnage en €/m³			Coût de débusquage en €/m³		
	Distance à la piste			Distance à la piste		
	< 70 m	entre 70 et 150 m	> 150 m	< 70 m	entre 70 et 150 m	> 150 m
≤ 40	8	8	10	8,5	8,5	14
40 < P ≤ 70	8	10	10	8,5	Impossible	
70 < P ≤ 100.....	10	10	11	14		
P > 100.....	Impossible					

FIGURE 9
CARTE DES COÛTS DE BÛCHERONNAGE,
DE DÉBUSQUAGE ET D'EXPLOITATION

Carte des coûts de bûcheronnage

- 8 euros/m³
- 10 euros/m³
- 11 euros/m³

Carte des coûts de débusquage

- 8,5 euros/m³
- 14 euros/m³

Carte des coûts d'exploitation

- 18 euros/m³
- 24 euros/m³
- 25 euros/m³

Photo M. MILLOT

Vue du site depuis le GR 20

- croisement des couches d'information pour définir les couvertures correspondant aux différents niveaux de coûts,
- superposition des différentes couches de coûts de bûcheronnage et de débusquage pour obtenir la carte des coûts totaux.

La démarche aurait été plus aisée si les barèmes avaient été des fonctions linéaires de pente (ou de distance à la piste) ou de classe de pente (ou de distance à la piste).

L'utilisation de fonctions d'accumulation dans les SIG en mode raster ouvre de nouvelles perspectives. En effet, non seulement elle permet de repérer le plus court chemin pour apporter une grume à une piste mais, par croisement d'informations, elle permet de faire ressortir les coûts d'exploitation par m³ de bois. Ici, les barèmes retenus sont fonction de la pente et de l'éloignement à la piste mais il est envisageable d'intégrer d'autres paramètres comme la portance et l'aspérité des sols qui conditionnent la pénétrabilité des parcelles forestières. Il est également possible d'intégrer des contraintes qui ne soient ni techniques ni topographiques. Imaginons, sur le site, un milieu d'une grande richesse environnementale et d'une forte sensibilité au traînage de grumes. Il est possible d'affecter aux cellules correspondant à ce milieu un "coût" environnemental lié aux précautions à prendre qui pourra être ajouté aux autres coûts.

CONCLUSIONS

Au niveau du massif du Niolo, les cartes réalisées permettront d'orienter les choix des gestionnaires pour le tracé de nouvelles routes forestières. Dans la perspective de la création d'un parc à grumes, souvent associé à de l'exploitation en régie, il deviendra important de mieux cerner les coûts de débusquage et débardage et de développer un réseau de pistes digne de ce nom.

Nous avons montré qu'il était possible, à partir de couches d'informations géographiques que possède tout gestionnaire forestier, de simuler les flux de bois sur la desserte forestière et de connaître les coûts de mobilisation des bois en tout point d'un massif à partir de barèmes d'exploitation locaux.

La quantification des flux de bois apporte des éléments immédiats pour la négociation de droits de passage ou de résorption de points noirs. Il reste malheureusement difficile, voire impossible, de convertir des volumes en dépenses d'entretien, trop de facteurs entrant en jeu dans la dégradation de la voirie.

Une simulation très rapide des conséquences de l'ouverture d'une piste sur les coûts d'exploitation permet d'optimiser le niveau de desserte selon le système d'exploitation forestière retenu (tracteur ou câble).

Photo M. MILLOT

Route forestière en forêt territoriale du Valdoniello

Enfin, ces travaux peuvent également servir pour décider du système d'exploitation qui offre le meilleur rapport coût/impact en calculant la part du coût de mobilisation imputable aux contraintes d'ordre environnemental. Il suffit en effet de donner un coût infini aux cellules correspondant à des périmètres de captage ou des habitats protégés, le principe d'accumulation selon le chemin de coût le plus faible cherchera un nouvel itinéraire évitant ces zones. Par comparaison des calculs, avec et sans contraintes, il sera possible d'avoir les surcoûts engendrés, dont la fiabilité dépendra de la finesse des barèmes utilisés et de la qualité des plans d'information (relief, réseau) dans le SIG.

Murièle MILLOT

CEMAGREF - Groupement de Grenoble
2, rue de la Papeterie - BP 76
F-38402 SAINT-MARTIN-D'HÈRES CEDEX

— Actuellement —

Adjointe au Chef du bureau
de la Forêt et des Territoires
Sous-direction de la Forêt et du Bois
DIRECTION GÉNÉRALE DE LA FORÊT
ET DES AFFAIRES RURALES
19, avenue du Maine
F-75732 PARIS CEDEX 15
(muriel.millot@agriculture.gouv.fr)

Fabrice TORRE

CENTRE RÉGIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ FORESTIÈRE
Résidence Sainte-Lucie
Route de Ville
F-20000 VILLE DI PIETRABUGNO
(fabrice.torre.crfp.corse@wanadoo.fr)

Sylvain LABBÉ

Laboratoire CEMAGREF
Maison de la Télédétection
500, rue Jean-François Breton
F-34093 MONTPELLIER CEDEX 05
(sylvain.labbe@cemagref.fr)

BIBLIOGRAPHIE

- ARMEF, CTBA, IDF. — Manuel d'exploitation forestière. — ARMEF, CTBA, IDF, 1993. — Tome 1 : 442 p.
- AUBAN (J.-M.). — 30 ans de routes forestières dans les Pyrénées. — Nancy : ENGREF, 1996. — 71 p. + annexes (Mémoire de 3^e année de FIF).
- BOURCET (J.). — Aperçu sur deux siècles d'histoire forestière en Corse. — *Revue forestière française*, vol. XLVIII, n° 6, 1996, pp. 563-579.
- BUDET (R.), MUNDLER (C.). — La Tournée Forêt méditerranéenne en Corse. — *Forêt méditerranéenne*, t. XVI, n° 2, 1995, pp. 117-131.
- BURLET (E.). — Entretien des routes forestières. — 1999. — 15 p.
- CRPF. — Amélioration du transport des bois en Bourgogne. — CRPF, 1993. — 53 p. + annexes.
- ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE ZÜRICH. — Entretien des chemins ruraux et forestiers. — École polytechnique fédérale de Zürich, 1991. — 130 p.
- MÉRY (J.). — Comment évaluer de façon objective les besoins en entretien des réseaux routiers forestiers ? — *Arborescences*, n° 50, 1994, pp. 12-13.
- MILLOT (M.). — Évaluation des flux de bois transitant sur la voirie forestière à l'aide d'un système d'information géographique : application à l'entretien des routes forestières et à l'évaluation des coûts d'exploitation sur un massif forestier. — 2001. — 34 p.
- ONF. — Routes forestières : recommandations techniques. — Office national des Forêts, 2000. — 137 p.

ÉVALUATION À L'AIDE D'UN SYSTÈME D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE DES FLUX DE BOIS TRANSITANT SUR LA VOIRIE FORESTIÈRE. Application à l'entretien des routes et à l'évaluation des coûts de mobilisation des bois (Résumé)

L'entretien de la voirie forestière n'est pas directement quantifiable à partir du trafic des grumiers qu'elle supporte, car d'autres paramètres comme la pente en long et la géologie sont prépondérants. Cependant, pour un tronçon de route donné, la variation du transit aura un impact significatif sur la variation des coûts d'entretien. À l'aide du SIG Arc Info, le Cemagref a montré qu'il était possible de simuler et de prévoir les flux de bois à chaque point de piste ou de route forestière. Des cartes de coûts d'exploitation bûcheronnage, débusquage et débardage peuvent également être produites sur l'ensemble d'un massif forestier pour peu que les barèmes existent. Les résultats ont été obtenus sur le site pilote du massif du Niolo en Haute-Corse.

AN EVALUATION OF TIMBER FLOWS OVER THE FOREST ROAD SYSTEM USING A GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM. Application to road maintenance and logging cost assessment (Abstract)

The cost of forest road system maintenance cannot be directly quantified on the basis of the traffic flows of that it supports because other parameters such as longitudinal gradient and geological features have considerable impact. However, for a given segment of road, variations in transit rates have a significant effect on variation in maintenance costs. Using the Arc Info GIS, Cemagref has demonstrated that timber flows can be simulated and predicted for every point on a forest road or track Maps establishing operating costs for logging, yarding and hauling can also be produced for entire forests as long as the tariff is available. Results were obtained for the pilot site at the Niolo Forest in Haute-Corse.