

# Raccolta di legna da ardere in Niger e generalizzazione della formula di Faustmann

C. R. Biol. 328 (2005) 379 – 385  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01386828>

Nicolas Bacaër

Institut de recherche pour le développement  
32 avenue Henri Varagnat, 93143 Bondy, Francia  
nicolas.bacaer@ird.fr

Alassane Bah

Università Cheikh Anta Diop di Dakar, École Supérieure Polytechnique  
DGI-SMA, BP 15915 Dakar-Fann, Senegal

Ali Mahamane

Abdou Moumouni University of Niamey  
Faculty of Sciences, Dipartimento di Biologia, BP 10662 Niamey, Niger

## riassunto

In alcune foreste del Niger, dove sono stati istituiti "mercati rurali controllati", la legna da ardere viene raccolta secondo una politica del seguente tipo: ogni  $T$  anni, tagliare alberi morti e alberi vivi con un diametro maggiore di  $D$ . Gli alberi morti in genere costituiscono la maggior parte del raccolto. In questo articolo, presentiamo un modello semplice in tempo continuo per la gestione di questi appezzamenti forestali irregolari soggetti a un alto tasso di mortalità  $\alpha$  e otteniamo una formula per il ciclo e il diametro di taglio che ottimizzano il reddito scontato, con un orizzonte infinito. La formula classica di Faustmann per grafici di dimensioni pari soddisfa il limite  $\alpha \rightarrow 0$  e  $D = 0$  (taglio netto).

Parole chiave: silvicoltura, foresta non uniforme, modellistica, ottimizzazione, legna da ardere, Niger

## 1. Introduzione

In Niger, il legno è ancora la fonte di energia più importante per cucinare i cibi. A causa della siccità, della crescente popolazione urbana e dell'accesso in parte incontrollato alla risorsa, la pressione sulle foreste intorno a città come Niamey è elevata. Dal 1989, una nuova strategia del governo ha portato alla protezione di alcune aree forestali, dove il raccolto è gestito in modo sostenibile. Il raccolto viene venduto esclusivamente nei mercati vicini con autorizzazione amministrativa. Un sistema fiscale differenziale incoraggia gli operatori commerciali ad acquistare legna da ardere da queste strutture piuttosto che organizzare la raccolta incontrollata delle foreste [1].

Sono stati scelti due sistemi di gestione. Nei "mercati rurali orientati" vengono raccolti solo alberi morti. Nei "mercati rurali controllati", vengono tagliati anche alcuni alberi viventi e il taglio è organizzato in cicli per consentire la rotazione spaziale. A volte viene fissato un limite inferiore per il diametro degli alberi viventi da tagliare. Possono essere necessari diversi cicli affinché un albero raggiunga questo diametro, in modo che gli alberi morti costituiscano generalmente la maggior parte di ogni raccolto. La durata del ciclo è in genere fissa tra 5 e 10 anni.

La politica di raccolta in questi mercati rurali controllati è quindi abbastanza simile al taglio selettivo praticato su terreni irregolari in altre parti del mondo. Ma l'importanza degli alberi morti è meno usuale a causa della sua destinazione (il legno morto è meglio del legno verde per cucinare il cibo), l'assenza di trasformazione e la sua disponibilità (il clima saheliano causa un'alta mortalità degli alberi).

Nonostante un'abbondante letteratura che affronti varie estensioni della formula classica di Faustmann [2,3] per il problema della rotazione ottimale ([4] e dei 300 articoli elencati in [5]), nessuna semplice formula è stata proposta per il ciclo di taglio ottimale e il diametro ottimale delle trame irregolari soggette a mortalità elevata, in cui gli alberi morti rappresentano la parte più grande del raccolto da utilizzare come legna da ardere. In [6], si ottiene una formula esplicita ma per foreste di età pari soggette a bassa mortalità catastrofica come il fuoco. Il modello utilizzava una variabile temporale continua e la formula è stata ottenuta utilizzando la teoria dei processi di rinnovo della ricompensa. Va sottolineato che con un'alta mortalità naturale, i singoli alberi muoiono di volta in volta e potrebbe esserci un ritardo prima che vengano tagliati durante il prossimo raccolto pianificato. Al contrario, con la mortalità catastrofica dovuta agli incendi, l'intera foresta viene colpita quasi istantaneamente e gli alberi vengono rimossi poco dopo. Nel primo caso, una semplice rotazione spaziale può essere mantenuta, mentre è impossibile nel secondo caso, come sottolineato [6].

In [7] si trova una formula che generalizza quella di Faustmann per le trame irregolari, ma il modello si è concentrato sulla parte economica senza tener conto di un particolare modello di crescita biologica. Questa formula è stata usata in [8] in combinazione con un modello di matrice a tempo discreto simile a [9,10] per la crescita; ma non è stata trovata una formula semplice per il ciclo di taglio ottimale, quindi i risultati erano basati solo su simulazioni. Numerosi articoli, come [11,12], insistono sul fatto che il modello Faustmann e molte delle sue generalizzazioni sono esempi particolari dei processi decisionali markoviani, per i quali è possibile utilizzare tecniche di programmazione dinamica. Ci concentriamo quindi più su algoritmi numerici che su formule esplicite. In tutti questi riferimenti, viene prestata poca attenzione alla mortalità naturale perché, in un contesto europeo o nordamericano, è relativamente trascurabile rispetto a molti altri fattori.

L'obiettivo di questo articolo è quindi quello di trovare, nell'ambito di un semplice modello di trama non invecchiato soggetto ad alta mortalità, una formula esplicita per la durata del ciclo ottimale e il diametro di taglio ottimale. Il criterio di ottimizzazione è lo stesso del modello Faustmann, ovvero il reddito attualizzato su un orizzonte infinito. L'interesse è principalmente teorico poiché ovviamente, nonostante [13], sono ancora necessarie molte ricerche sul campo prima di ottenere dati sufficienti per calibrare il modello nelle foreste del Niger. Tuttavia, man mano che vengono organizzati mercati rurali sempre più controllati in Niger e in tutta la zona del Sahel, diventeranno disponibili più dati e l'interesse potrebbe spostarsi da come gestire la foresta a come ottimizzare la gestione.

L'articolo è organizzato come segue. Nella sezione 2, introduciamo le notazioni del modello. Nella sezione 3, otteniamo una formula per il ciclo di taglio ottimale e il diametro ottimale, quindi ne discutiamo usando una semplice espressione matematica per la curva di crescita dell'albero. Nella sezione 4, mostriamo che la formula classica di Faustmann corrisponde al limite di mortalità trascurabile ( $\alpha \rightarrow 0$ ) e un diametro di taglio  $D = 0$  (taglio netto). Mostriamo anche che la formula per la resa media di grafici di età pari soggetti a mortalità bassa ma catastrofica come gli incendi, data in [6], corrisponde al limite di un ciclo di taglio  $T \rightarrow 0$  con un tasso di sconto  $\beta \rightarrow 0$ . Presentiamo anche altre estensioni della formula: ad una mortalità dipendente dall'età e ad una possibile differenza di prezzo tra legno morto e legno verde tagliato di recente. Possono essere utilizzati in altri contesti.

## 2. Un modello semplice

Assumiamo :

- una trama ha un numero fisso  $N$  di posti in cui gli alberi crescono.  $N$  è un numero elevato.

- $V(x)$  è il volume di un albero di età  $x$ ,  $V(0) = 0$
- il prezzo  $P$  per unità di volume di legno è costante
- $c$  è il costo di preparazione per la crescita di un nuovo albero
- $c'$  è un costo fisso per raccolto
- $\alpha$  è la mortalità degli alberi: durante un breve intervallo di tempo  $dt$ ,  $\alpha dt$  è la percentuale di alberi che muoiono (se si considera il modello come deterministico) o la probabilità che un albero muoia (se si considera il modello come stocastico). Per il momento, si presume che  $\alpha$  sia indipendente dall'età, ma questa ipotesi sarà abbandonata nella sezione 4.
- la durata del ciclo di taglio è  $T$
- ogni  $T$  anni, la raccolta è composta da tutti gli alberi morti e tutti gli alberi viventi il cui diametro è maggiore di  $D$
- $X$  è l'età in cui gli alberi raggiungono il diametro  $D$ .

Si presume che la rigenerazione sia puramente artificiale: gli alberi che sono stati tagliati vengono sostituiti senza indugio da nuovi alberi di età 0, in modo che il numero totale di alberi rimanga costante. Si presume che la rigenerazione naturale sia trascurabile durante una rotazione. Infine, lascia che  $\beta$  sia un fattore di sconto in modo tale che il reddito al momento  $t = nT$  sia ponderato per un fattore  $e^{-\beta nT}$  nel criterio di ottimizzazione. Il problema è scegliere  $T$  e  $X$  per ottimizzare le aspettative di reddito scontato su tutte le colture future.

formalmente,

- $p(x, t)$  è l'aspettativa della densità di popolazione degli alberi viventi di età  $x$  al momento  $t$ ,
- $q(x, t)$  è l'attesa della densità di popolazione di alberi morti di età  $x$  al momento  $t$  (quando muoiono, gli alberi smettono di invecchiare),
- $K_n$  è l'aspettativa di reddito dalla raccolta al tempo  $t = nT$ .

Il problema può essere formulato come un sistema di equazioni differenziali parziali con controllo impulsivo. Ricordiamo che queste equazioni differenziali parziali sono semplicemente l'equivalente in tempo continuo dei modelli di matrice in tempo discreto strutturato per età. Questo approccio è ad esempio quello di [15,16], in cui la raccolta è continua e non periodica. Tra i raccolti ( $nT < t < (n+1)T$ ), le funzioni controllano

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \alpha p(x, t) = 0, \quad \frac{\partial q}{\partial t} = \alpha p(x, t),$$

e  $p(0, t) = 0$ .  $nT^-$  e  $nT^+$  indicano rispettivamente "poco prima di  $t = nT$ " e "subito dopo  $t = nT$ ". Abbiamo quindi

$$p(x, nT^+) = \left[ \int_0^\infty q(\xi, nT^-) d\xi + \int_X^\infty p(\xi, nT^-) d\xi \right] \delta_{x=0} + p(x, nT^-) \mathbf{1}_{x \in ]0, X[}$$

e  $q(x, nT^+) = 0$ . Qua,  $\delta_{x=0}$  indica la massa di Dirac in  $x = 0$ , mentre  $\mathbf{1}_{x \in ]0, X[}$  indica la funzione caratteristica dell'intervallo  $]0, X[$ . L'aspettativa di reddito a  $t = nT$  è

$$K_n = \int_0^\infty q(x, nT^-) [PV(x) - c] dx + \int_X^\infty p(x, nT^-) [PV(x) - c] dx - c'.$$

L'obiettivo è massimizzare rispetto a  $T$  e  $X$  l'aspettativa del reddito attualizzato su tutte le colture future

$$\sum_{n=1}^{\infty} e^{-\beta nT} K_n.$$

Le funzioni  $p(x, t)$  e  $q(x, t)$  controlla anche le condizioni iniziali con

$$\int_0^\infty [p(x, 0) + q(x, 0)] dx = N.$$

Questo modello è equivalente al classico modello Faustmann per il problema della rotazione ottimale se  $\alpha = 0$  e  $X = 0$ .

### 3. Ciclo e diametro di taglio ottimali

Indipendentemente dalla struttura per età della condizione iniziale, le densità  $p(x, t)$  e  $q(x, t)$  convergono if  $t \rightarrow +\infty$  verso soluzioni periodiche  $\hat{p}(x, t)$  e  $\hat{q}(x, t)$ , con

$$\begin{aligned} \hat{p}(x, nT^-) &= N \frac{1 - e^{-\alpha T}}{1 - e^{-i\alpha T}} \sum_{k=1}^i e^{-k\alpha T} \delta_{x=kT} \\ \hat{q}(x, nT^-) &= N \frac{1 - e^{-\alpha T}}{1 - e^{-i\alpha T}} \alpha e^{-\alpha x} \mathbf{1}_{x \in (0, iT)} \\ \hat{p}(x, nT^+) &= N \frac{1 - e^{-\alpha T}}{1 - e^{-i\alpha T}} \sum_{k=0}^{i-1} e^{-k\alpha T} \delta_{x=kT} \end{aligned}$$

e  $\hat{q}(x, nT^+) = 0$ .  $i = [X/T] + 1$  (e  $[X/T]$  è l'intera parte di  $X/T$ ). Si noti che se  $X < T$  (così che  $i = 1$ ), tutti gli alberi viventi che raggiungono  $t = nT^-$  hanno la stessa età (anche trama) e vengono raccolti in  $t = nT$  contemporaneamente agli alberi morti (taglio netto). Al contrario, se  $X > T$  (così che  $i \geq 2$ ), alberi vivi che raggiungono  $t = nT^-$  hanno per età  $T, 2T, \dots, iT$ , (trama irregolare) e solo quelli di età compresa tra  $iT$  sono raccolti a  $t = nT$  con alberi morti (selezione). Quindi il numero intero  $i$  rappresenta il numero di cicli che un albero può continuare a crescere prima di essere raccolto, a meno che non muoia, nel qual caso l'albero viene raccolto durante il primo raccolto dopo la morte. Gli alberi morti raccolti a  $t = nT$  forniscono reddito

$$N \frac{1 - e^{-\alpha T}}{1 - e^{-i\alpha T}} \int_0^{iT} \alpha e^{-\alpha x} [PV(x) - c] dx.$$

Gli alberi vivi raccolti a  $t = nT$  sono quelli dell'età  $iT$ . Danno reddito

$$N \frac{1 - e^{-\alpha T}}{1 - e^{-i\alpha T}} e^{-i\alpha T} [PV(iT) - c].$$

Il reddito totale a  $t = nT$  è quindi (dopo l'integrazione per parti)

$$K_n = N \frac{1 - e^{-\alpha T}}{1 - e^{-i\alpha T}} \left[ P \int_0^{iT} e^{-\alpha x} V'(x) dx - c \right] - c'.$$

Infine, l'aspettativa del reddito totale su tutte le colture future è

$$\frac{1}{e^{\beta T} - 1} \left\{ N \frac{1 - e^{-\alpha T}}{1 - e^{-i\alpha T}} \left[ P \int_0^{iT} e^{-\alpha x} V'(x) dx - c \right] - c' \right\},$$

per il quale dobbiamo trovare il massimo, rispetto al  $T$  e  $X$ . Equivalentemente, il massimo deve essere trovato rispetto a  $T$  e all'intero  $i = \lceil X/T \rceil + 1$ . È la generalizzazione della classica formula di Faustmann per il management considerato (come vedremo nella prossima sezione). Per ridurre il numero di parametri di discussione, scriviamo la formula

$$NPV_{\infty} \frac{1}{e^{\beta T} - 1} \left\{ \frac{1 - e^{-\alpha T}}{1 - e^{-i\alpha T}} \left[ \int_0^{iT} e^{-\alpha x} \frac{V'(x)}{V_{\infty}} dx - \frac{c}{PV_{\infty}} \right] - \frac{c'}{NPV_{\infty}} \right\}.$$

$V_{\infty}$  è il volume massimo che un albero può raggiungere durante la sua vita. Nota che

- $c/(PV_{\infty})$  è il rapporto tra il costo del taglio e del reimpianto di un albero da un lato, il valore massimo di un albero dall'altro
- $c'/(NPV_{\infty})$  è il rapporto tra il costo fisso per raccolto e il valore massimo di una trama.

Per discutere di questa formula, considera una semplice espressione matematica  $V(x)$  per la curva di crescita dell'albero, o equivalente per la sua derivata  $V'(x)$ , per esempio

$$V'(x) = V_{\infty} \frac{(\gamma/\tau)^{\gamma+1}}{\Gamma(\gamma+1)} x^{\gamma} e^{-\gamma x/\tau},$$

dove  $\Gamma$  è la solita funzione Gamma. Questa funzione, che dovrebbe rappresentare la velocità di crescita, aumenta da 0 a un massimo che viene raggiunto in  $x = \tau$ , quindi diminuisce mentre converge verso 0 quando  $x \rightarrow \infty$ . pertanto  $V(x) = \int_0^x V'(\xi) d\xi$  è una funzione crescente che è convessa per  $x < \tau$  e concava per  $x > \tau$ . La parametrizzazione evidenzia il volume massimo di un albero  $V_{\infty} = \lim_{x \rightarrow \infty} V(x)$ .

La Figura 1 illustra come l'aspettativa di reddito attualizzato possa variare a seconda della lunghezza  $T$  del ciclo di taglio per diversi valori del diametro di taglio, che corrispondono a  $i = 1, \dots, 4$ . La curva più a destra è quella con  $i = 1$  (taglio netto e persino trama). La strategia ottimale è  $T^* \simeq 9,5$  e  $i = 2$ , vale a dire tagliando tutto  $T^*$  alberi morti di anni e alberi viventi  $2T^*$  o più. Si noti che tutte le curve diventano negative quando  $T$  si avvicina a 0 a causa del costo fisso diverso da zero per raccolto. I valori dei parametri utilizzati per questa figura sono  $\alpha = 0,05$  all'anno (l'aspettativa di vita degli alberi è  $1/\alpha = 20$  anni),  $\tau = 10$  anni (questa è l'età in più rapida crescita) e  $\gamma = 2$  per la curva di crescita, un fattore di sconto  $\beta = 0,03$  costi all'anno  $c/(PV_{\infty}) = 0$  e  $c'/(NPV_{\infty}) = 0,1$  e un valore massimo della trama normalizzata  $NPV_{\infty} = 1$ .

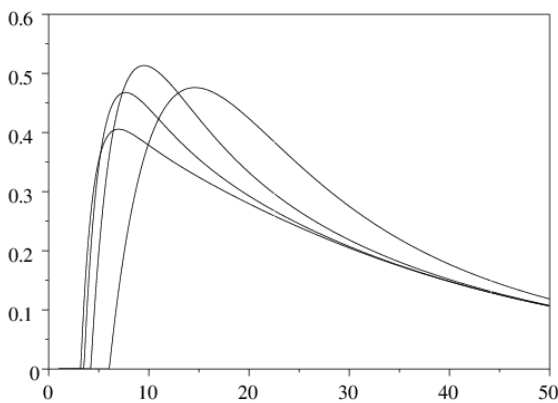


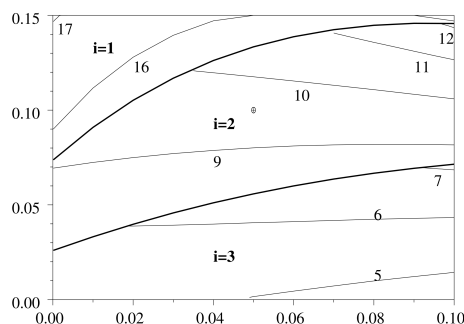
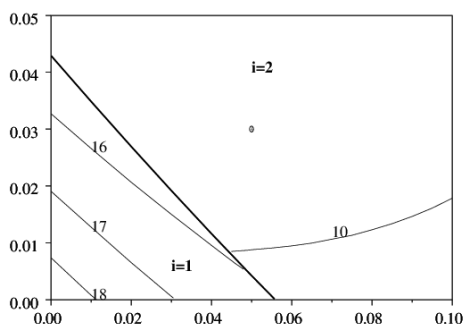
Figura 1. Aspettativa di entrate attualizzate in funzione della lunghezza del ciclo di taglio  $T$  per diversi valori del diametro di taglio (che corrispondono a  $i = 1 \dots 4$ ).

La Figura 2 illustra come il ciclo di taglio e il diametro ottimali variano con la mortalità  $\alpha$ , il tasso di sconto  $\beta$  e il costo fisso per raccolto. I valori per i parametri fissi sono gli stessi della figura 1. Come previsto, le gestioni diseguali con un breve ciclo di taglio (rappresentato dalle zone  $i = 2$  e  $i = 3$ ) sono più redditizie delle gestioni pari ( $i = 1$ )

- quando la mortalità è alta (figure in alto a sinistra e in alto a destra),
- quando il fattore di sconto è elevato (cifre sopra a sinistra e in basso),
- o quando il costo fisso per raccolto è basso (in alto a destra e in basso).

Nota nella figura in alto a sinistra (risp. in alto a destra) che anche entro il limite  $\alpha \rightarrow 0$  (nel caso del modello di Faustmann), la gestione non uniforme diventa più redditizia della gestione pari se il tasso di sconto (rispettivamente il costo fisso per raccolto) è superiore (o inferiore) a una determinata soglia.

La Figura 2 mostra anche le linee di contorno per la lunghezza ottimale del ciclo di taglio. Si noti che non esiste una relazione semplice tra la lunghezza ottimale del ciclo di taglio e la mortalità: la prima può essere una funzione crescente o decrescente della seconda, a seconda dei valori dei parametri, come nella figura sopra a destra.



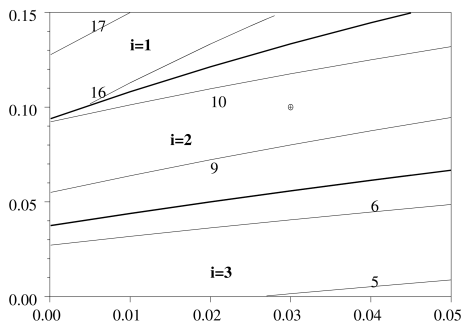


Figura 2. Durata e diametro del ciclo ottimali quando varia la mortalità  $\alpha$ , il tasso di sconto  $\beta$  e il costo fisso per raccolto  $c'$ . In alto a sinistra: diagramma  $(\alpha, \beta)$ . In alto a destra: diagramma  $(\alpha, c'/NPV_\infty)$ . In basso: diagramma  $(\beta, c'/NPV_\infty)$ . Le linee in grassetto separano le aree in cui  $i = 1$  (anche la gestione è ottimale) dalle aree in cui  $i = 2$  e  $i = 3$  (la gestione irregolare è ottimale). Le altre linee sono le linee di livello per la lunghezza ottimale del ciclo di taglio. In ogni caso, un punto richiama i valori dei parametri nella Figura 1.

#### 4. Casi limite ed estensioni

Se impostiamo il diametro critico  $D$  del taglio di alberi viventi su 0 (taglio chiaro), l'età corrispondente è  $X = 0$ . Quindi  $i = 1$  e la formula (1) è ridotta a

$$\frac{1}{e^{\beta T} - 1} \left\{ N \left[ P \int_0^T e^{-\alpha x} V'(x) dx - c \right] - c' \right\}.$$

Se in aggiunta il costo fisso per raccolto  $c'$  e la mortalità  $\alpha$  è trascurabile, quindi le formule sono ridotte a quella di Faustmann [2,3]

$$N \frac{PV(T) - c}{e^{\beta T} - 1}.$$

Un altro caso limite si ottiene se il fattore di sconto  $\beta$  e la lunghezza del ciclo di taglio  $T$  convergono a 0, il che corrisponde a guardare il reddito medio con un raccolto continuo di alberi morti e alberi viventi la cui età è maggiore di  $X$ . Ricorda il legame tra il reddito medio annuo e il reddito scontato su tutti i raccolti futuri:

$$\lim_{\nu \rightarrow \infty} \frac{1}{\nu T} \sum_{n=1}^{\nu} K_n = \lim_{\beta \rightarrow 0} \beta \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\beta n T} K_n.$$

Continuiamo  $c' = 0$ . La formula (1) fornisce quindi il reddito medio

$$N \alpha \frac{P \int_0^X e^{-\alpha x} V'(x) dx - c}{1 - e^{-\alpha X}},$$

e le densità  $p(x, t)$  e  $q(x, t)$  convergere su soluzioni fisse

$$\hat{p}(x) = N \frac{\alpha e^{-\alpha x}}{1 - e^{-\alpha X}} \mathbf{1}_{x \in (0, X)}$$

e  $\hat{q}(x) = 0$ . La formula (2) è la stessa di [6] per il reddito medio nelle foreste soggette a un rischio di incendio catastrofico. Anzi, se  $T \rightarrow 0$ , non vi è alcun ritardo tra la morte dell'albero e il suo raccolto, come in [6]. È quindi normale che il reddito medio sia lo stesso. Tuttavia, la sincronizzazione dei decessi nel caso dell'incendio determina una differenza nell'espressione del reddito scontato.

Estensioni. Supponiamo che la mortalità, anziché essere costante, dipenda dall'età. Definiamo

$$\Delta(x) = \exp\left(-\int_0^x \alpha(\xi) d\xi\right).$$

Se  $Q$  è il prezzo del legno morto, se  $P$  è il prezzo del legno verde tagliato di recente, l'aspettativa di un reddito scontato su tutti i raccolti futuri è

$$\frac{1}{e^{\beta T} - 1} \left\{ N \frac{\Delta(iT) [PV(iT) - c] - \int_0^{iT} \Delta'(x) [QV(x) - c] dx}{\sum_{n=0}^{i-1} \Delta(nT)} - c' \right\},$$

con  $i = [X/T] + 1$ . La formula (1) corrisponde a  $Q = P$  e alla costante  $\alpha$ , quindi  $\Delta(x) = \exp(-\alpha x)$ . Entro il limite in cui  $\beta \rightarrow 0$  e  $T \rightarrow 0$ , questa formula (con  $c' = 0$ ) porta a un reddito medio

$$N \frac{\Delta(X) [PV(X) - c] - \int_0^X \Delta'(x) [QV(x) - c] dx}{\int_0^X \Delta(x) dx},$$

una formula che si trova in [6] nel contesto di foreste a rischio di incendio ma in cui è possibile recuperare parte della legna bruciata.

#### 5. conclusione

Nel quadro di un modello semplice, è stata trovata una formula per la lunghezza ottimale del ciclo di taglio e il diametro quando la gestione consiste nel tagliare alberi morti e alberi vivi con un diametro maggiore di  $D$  ogni  $T$  anni. Questo modello è stato progettato per le foreste soggette ad alta mortalità naturale, in cui gli alberi morti costituiscono la parte principale del raccolto e vengono utilizzati come legna da ardere. Abbiamo visto che la gestione a medio termine era più favorevole in queste circostanze. Quando la mortalità naturale è bassa, il tasso di sconto basso o il costo fisso per raccolto elevato, anche la gestione può essere più redditizia.

La gestione delle foreste in Niger e in altri paesi del Sahel è ancora agli inizi. La rotazione è stata introdotta solo un decennio fa. I dati sul campo sono ancora scarsi. Nonostante le numerose ricerche accumulate nel corso di oltre 150 anni sul problema della rotazione ottimale nei paesi sviluppati, è necessario l'adattamento alle condizioni locali. In questo studio, ci concentriamo su un solo aspetto, ovvero l'elevata mortalità naturale. Speriamo che questo modello microeconomico sia combinato con modelli macroeconomici [17,18,19] per fornire uno strumento di modellizzazione più completo per gli operatori pubblici.

## Grazie

Il secondo autore ringrazia Édith Perrier (IRD), Alain Bertrand, Martine Antona, Christophe Le Page (CIRAD) e Aboubacar Ichaou (Ministero dell'Ambiente del Niger). Questo articolo è dedicato alla memoria di Ovide Arino.

## Riferimenti bibliografici

1. J. M. d'HerbEs, J. M. K. Ambouta, R. Peltier, *Fonctionnement et gestion des écosystèmes forestiers contractés sahéliens*, John Libbey Eurotext, Paris, 1997.
2. M. Faustmann, Berechnung des Wertes welchen Waldboden sowie noch nicht haubare Holzbestände für die Waldwirtschaft besitzen. *Allgemeine Forst – und Jagd – Zeitung* 15 (1849).
3. C. W. Clark, *Mathematical bioeconomics : the optimal management of renewable resources*, John Wiley & Sons, New York, 1990.
4. D. H. Newman, *The optimal forest rotation : a discussion and annotated bibliography*, USDA Forest Service, Technical Report SE – 48, Asheville, 1988.
5. J. *Forest Econ.* 8 (2002) 5 – 27.
6. *Can. J. For. Res.* 15 (1985) 180 – 190.
7. *For. Sci.* 27 (1981) 739 – 744.
8. *Forest policy and economics* 6 (2004) 145 – 152.
9. *J. Appl. Ecol.* 8 (1966) 355 – 367.
10. *For. Sci.* 26 (1980) 609 – 625.
11. *For. Sci.* 47 (2001) 466 – 474.
12. J. Buongiorno, J. K. Gilless, *Decision methods for forest resource management*, Academic Press, Boston, 2003.
13. A. Ichaou, *Dynamique et productivité des structures forestières contractées des plateaux de l'ouest nigérien*, ThEse, Université de Toulouse III, 2000.
14. [www.handels.gu.se/econ/EEU/cifor.html](http://www.handels.gu.se/econ/EEU/cifor.html)
15. C. Rorres, W. Fair, *Optimal age specific harvesting policy for a continuous – time population model*, in : T. A. Burton (Ed. ), *Modeling and differential equations in biology*, Marcel Dekker, New York, 1980, pp.239 – 254.
16. [www2.fundacion-centra.org/pdfs/E200337.pdf](http://www2.fundacion-centra.org/pdfs/E200337.pdf)
17. CSFD, *Pour une gestion viable des ressources ligneuses péri – urbaines : analyse et modélisation des impacts des règles et des pratiques coutumières sur divers milieux naturels sahéliens et sahélo – soudaniens au Niger et au Mali*, [www.csf-desertification.org/projets/projet3.php](http://www.csf-desertification.org/projets/projet3.php)
18. [www.dec.org/pdf\\_docs/PNACQ877.pdf](http://www.dec.org/pdf_docs/PNACQ877.pdf)
19. MARGE, *Le modEle GLOBUS*, [www.marge.fr](http://www.marge.fr)