

Brandhoutoogst in Niger en een veralgemening van de formule van 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, Frankrijk
nicolas.bacaer@ird.fr

Alassane Bah

Universiteit Cheikh Anta Diop van Dakar, École Supérieure Polytechnique
DGI-SMA, BP 15915 Dakar-Fann, Senegal

Ali Mahamane

Abdou Moumouni University of Niamey
Faculteit Wetenschappen, Departement Biologie, BP 10662 Niamey, Niger

Overzicht

In sommige bossen in Niger, waar "gecontroleerde plattelandsmarkten" zijn gevestigd, wordt brandhout geoogst volgens een beleid van het volgende type: om de T jaar kappen van dode bomen en levende bomen met een diameter groter dan D . Dode bomen vormen over het algemeen het grootste deel van het gewas. In dit artikel presenteren we een eenvoudig model in continue tijd voor het beheer van deze ongelijke oude bospercelen met een hoog sterftecijfer α , en we verkrijgen een formule voor de cyclus en de snijdiameter die het verdisconteerde inkomen optimaliseert, met een oneindige horizon. Faustmann's klassieke formule voor even grote percelen voldoet aan de limiet $\alpha \rightarrow 0$ en $D = 0$ (duidelijk gesneden).

Sleutelwoorden: bosbouw, bos van ongelijke leeftijd, modellering, optimalisatie, brandhout, Niger

1. Inleiding

In Niger is hout nog steeds de belangrijkste energiebron voor het koken van voedsel. Door droogte, een groeiende stedelijke bevolking en deels ongecontroleerde toegang tot de hulpbronnen, staat de druk op bossen rond steden zoals Niamey hoog. Sinds 1989 heeft een nieuwe overheidsstrategie geleid tot de bescherming van bepaalde bosgebieden, waar de oogst op een duurzame manier wordt beheerd. De oogst wordt uitsluitend verkocht in nabijgelegen markten met administratieve toestemming. Een differentieel belastingstelsel moedigt handelaren aan om brandstofhout van deze constructies te kopen in plaats van het ongecontroleerd oogsten van bossen te organiseren [1].

Er is gekozen voor twee managementsystemen. In "georiënteerde plattelandsmarkten" worden alleen dode bomen geoogst. In "gecontroleerde landelijke markten" worden ook enkele levende bomen gekapt en wordt de snede in cycli georganiseerd om ruimtelijke rotatie mogelijk te maken. Soms wordt een ondergrens gesteld aan de diameter van te kappen levende bomen. Het kan verschillende cycli duren voordat een boom deze diameter heeft bereikt, zodat dode bomen over het algemeen het grootste deel van elk gewas uitmaken. De lengte van de cyclus ligt doorgaans tussen 5 en 10 jaar.

Het oogstbeleid in deze gecontroleerde plattelandsmarkten is daarom vrij gelijkaardig aan selectief maaien op oneffen percelen in andere delen van de wereld. Maar het belang van dode bomen is minder gebruikelijk vanwege de bestemming (dood hout is beter dan groen hout voor het koken van voedsel), de afwezigheid van transformatie en de beschikbaarheid ervan (het Sahel-klimaat veroorzaakt een hoge mortaliteit van bomen).

Onlangs een overvloed aan literatuur die verschillende uitbreidingen van de klassieke formule van Faustmann [2,3] behandelt voor het probleem van optimale rotatie ([4] en de 300 artikelen vermeld in [5]), is er geen eenvoudige formule geweest voorgesteld voor de optimale maaicyclus en de optimale diameter van percelen met een ongelijke leeftijd die gevoelig zijn voor hoge sterfte, waarbij dode bomen het grootste deel van de oogst uitmaken voor brandhout. In [6] wordt een expliciete formule verkregen, maar voor even oude bossen met een lage catastrofale sterfte zoals brand. Het model gebruikte een continue tijdvariabele en de formule werd verkregen met behulp van de theorie van beloningsvernieuwingprocessen. Benadrukt moet worden dat bij een hoge natuurlijke sterfte, enkele bomen gaan van tijd tot tijd dood en er kan een vertraging optreden voordat ze worden gekapt tijdens de volgende geplande oogst. Integendeel, met een catastrofale sterfte als gevolg van branden, wordt het hele bos vrijwel onmiddellijk aangetast en worden de bomen kort daarna verwijderd. In het eerste geval kan een eenvoudige ruimtelijke rotatie worden gehandhaafd, terwijl dit in het tweede geval onmogelijk is, zoals opgemerkt [6].

Men vindt in [7] een formule die die van Faustmann generaliseert voor de ongelijke percelen, maar het model concentreerde zich op het economische deel zonder rekening te houden met een bepaald model van biologische groei. Deze formule werd gebruikt in [8] in combinatie met een discreet-tijd matrixmodel vergelijkbaar met [9,10] voor groei; maar er werd geen eenvoudige formule gevonden voor de optimale snijcyclus, dus de resultaten waren alleen gebaseerd op simulaties. Verschillende artikelen, zoals [11,12], benadrukken dat het Faustmann-model en veel van zijn generalisaties bijzondere voorbeelden zijn van Markoviaanse besluitvormingsprocessen, waarvoor dynamische programmeertechnieken kunnen worden gebruikt. We richten ons dan meer op numerieke algoritmen dan op expliciete formules. In al deze referenties wordt weinig aandacht besteed aan natuurlijke sterfte omdat deze in een Europese of Noord-Amerikaanse context relatief te verwaarlozen is in vergelijking met verschillende andere factoren.

Het doel van dit artikel is daarom om, binnen het kader van een eenvoudig ongelijk verouderd perceelmodel met hoge mortaliteit, een expliciete formule te vinden voor de duur van de optimale cyclus en de optimale snijdiameter. Het optimalisatiecriterium is hetzelfde als in het Faustmann-model, namelijk het verdisconteerde inkomen over een oneindige horizon. De belangstelling is voornamelijk theoretisch, want ondanks [13] is er natuurlijk nog veel veldwerk nodig om voldoende gegevens te verzamelen om het model in de bossen van Niger te kalibreren. Maar naarmate meer en meer gecontroleerde plattelandsmarkten worden georganiseerd in Niger en in de hele Sahel-zone, zullen er meer gegevens beschikbaar komen en kan de interesse verschuiven van hoe het bos te beheren naar hoe het beheer te optimaliseren.

Het artikel is als volgt ingedeeld. In paragraaf 2 introduceren we de notaties van het model. In paragraaf 3 verkrijgen we een formule voor de optimale snijcyclus en de optimale diameter, en bespreken we deze met een eenvoudige wiskundige uitdrukking voor de boomgroeicurve. In paragraaf 4 laten we zien dat de klassieke Faustmann-formule overeenkomt met de grens van verwaarloosbare sterfte ($\alpha \rightarrow 0$) en een snijdiameter $D = 0$ (duidelijk gesneden). We laten ook zien dat de formule voor de gemiddelde opbrengst van even oude percelen met een lage maar catastrofale mortaliteit zoals branden, gegeven in [6], overeenkomt met de limiet van een snijcyclus $T \rightarrow 0$ met een discontovoet $\beta \rightarrow 0$. We presenteren ook andere uitbreidingen van de formule: naar een leeftijdsafhankelijke sterfte en naar een mogelijk prijsverschil tussen dood hout en recent gesneden groen hout. Ze kunnen in andere contexten worden gebruikt.

2. Een eenvoudig model

Wij nemen aan :

- een perceel heeft een vast aantal N plaatsen waar bomen kunnen groeien. N is een groot aantal.
- $V(x)$ is het volume van een boom van leeftijd x , $V(0) = 0$
- de prijs P per volume-eenheid hout is constant
- c zijn de kosten voor de voorbereiding op de groei van een nieuwe boom
- c' is een vaste kost per oogst
- α is de sterfte van de bomen: gedurende een klein tijdsinterval dt , αdt is het percentage bomen dat sterft (als je het model als deterministisch beschouwt), of de kans dat een boom sterft (als je het model als stochastisch beschouwt). Vooralnog wordt aangenomen dat α onafhankelijk is van leeftijd, maar deze hypothese wordt in paragraaf 4 losgelaten.
- de duur van de snijcyclus is T
- elke T jaar bestaat de oogst uit alle dode bomen en alle levende bomen waarvan de diameter groter is dan D
- X is de leeftijd waarop de bomen de diameter D bereiken.

Aangenomen wordt dat regeneratie puur kunstmatig is: de gekapte bomen worden onverwijld vervangen door nieuwe bomen van 0 jaar, zodat het totaal aantal bomen constant blijft. Aangenomen wordt dat natuurlijke regeneratie tijdens een rotatie te verwaarlozen is. Laat tenslotte β een disconteringsfactor zijn zodat het inkomen op tijdstip $t = nT$ wordt gewogen met een factor $e^{-\beta nT}$ in het optimalisatiecriterium. Het probleem is om T en X te kiezen om de verwachting van een verdisconteerd inkomen op alle toekomstige gewassen te optimaliseren.

Formeel,

- $p(x, t)$ is de verwachting van de bevolkingsdichtheid van levende bomen van leeftijd x op tijdstip t ,
- $q(x, t)$ is de verwachting van de bevolkingsdichtheid van dode bomen van leeftijd x op tijdstip t (wanneer ze afsterven, stoppen de bomen met verouderen),
- K_n is de verwachting van inkomen van oogst tot tijd $t = nT$.

Het probleem kan worden geformuleerd als een systeem van partiële differentiaalvergelijkingen met impulsieve controle. Laten we niet vergeten dat deze partiële differentiaalvergelijkingen gewoon het equivalent zijn in continue tijd van de matrixmodellen in discrete tijd gestructureerd naar leeftijd. Deze aanpak is bijvoorbeeld die van [15,16], waar de oogst continu en niet periodiek is. Tussen oogsten ($nT < t < (n+1)T$), de functiecontrole

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

en $p(0, t) = 0$. nT^- en nT^+ respectievelijk aanduiden "net voor $t = nT$ " en "net na $t = nT$ ". We hebben dan

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

en $q(x, nT^+) = 0$. Hier, $\delta_{x=0}$ duidt de Dirac-massa in $x = 0$, terwijl $\mathbf{1}_{x \in]0, X[}$ geeft de karakteristieke functie van het interval aan $]0, X[$. De inkomensverwachting bij $t = nT$ is

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

Het doel is om, met betrekking tot T en X , de verwachting van een verdisconteerd inkomen op alle toekomstige gewassen te maximaliseren

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

De functies $p(x, t)$ en $q(x, t)$ controleer ook de beginvoorwaarden met

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

Dit model is equivalent aan het klassieke Faustmann-model voor het probleem van optimale rotatie als $\alpha = 0$ en $X = 0$.

3. Optimale snijcyclus en diameter

Ongeacht de leeftijdsopbouw van de beginconditie, de dichtheden $p(x, t)$ en $q(x, t)$ convergeren als $t \rightarrow +\infty$ naar periodieke oplossingen $\hat{p}(x, t)$ en $\hat{q}(x, t)$, met

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

en $\hat{q}(x, nT^+) = 0$. $i = \lfloor X/T \rfloor + 1$ (en $\lfloor X/T \rfloor$ is het hele deel van X/T). Merk op dat als $X < T$ (zodat $i = 1$), alle levende bomen die bereiken $t = nT^-$ zijn dezelfde leeftijd (zelfs plot) en worden geoogst op $t = nT$ tegelijk met de dode bomen (kaal). Integendeel, als $X > T$ (zodat $i \geq 2$), levende bomen die reiken $t = nT^-$ hebben voor leeftijd $T, 2T, \dots, iT$, (oneffen perceel) en alleen degenen die verouderd zijn van iT worden geoogst op $t = nT$ met dode bomen (selectie). Dus het hele nummer i staat voor het aantal cycli dat een boom kan blijven groeien voordat hij wordt geoogst, tenzij hij sterft, in welk geval de boom wordt geoogst tijdens de eerste oogst na de dood. Dode bomen geoogst op $t = nT$ leveren inkomen op

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

De levende bomen geoogst op $t = nT$ zijn die van de leeftijd iT . Ze geven inkomen

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

Het totale inkomen op $t = nT$ is dus (na integratie door delen)

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

Ten slotte is de verwachting van het totale inkomen op alle toekomstige gewassen

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

waar moeten we de maximum, ten opzichte van vinden T en X . Evenzo moet het maximum worden gevonden met betrekking tot T en het gehele getal $i = \lfloor X/T \rfloor + 1$. Het is de veralgemening van de klassieke Faustmann-formule voor het beschouwde management (zoals we in de volgende sectie zullen zien). Laten we de formule schrijven om het aantal discussieparameters te verminderen

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

V_{∞} is het maximale volume dat een boom tijdens zijn levensduur kan bereiken. Let daar op

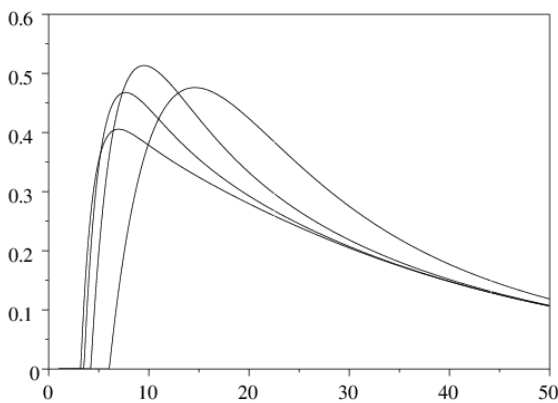
- $c/(PV_{\infty})$ is de verhouding tussen de kosten van het kappen en herplanten van een boom enerzijds en de maximale waarde van een boom anderzijds
- $c'/(NPV_{\infty})$ is de verhouding tussen de vaste kosten per oogst en de maximale waarde van een perceel.

Overweeg een eenvoudige wiskundige uitdrukking om deze formule te bespreken $V(x)$ voor de boomgroei-curve, of equivalent voor zijn afgeleide $V'(x)$, bijvoorbeeld

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

waar Γ de gebruikelijke gammafunctie is. Deze functie, die de groeisnelheid moet vertegenwoordigen, neemt toe van 0 tot een maximum dat wordt bereikt bij $x = \tau$, en neemt vervolgens af terwijl het naar 0 convergeert wanneer $x \rightarrow \infty$. Dus $V(x) = \int_0^x V'(\xi) d\xi$ is een toenemende functie die convex is voor $x < \tau$ en concaaf voor $x > \tau$. Parametrering markeert het maximale volume van een boom $V_{\infty} = \lim_{x \rightarrow \infty} V(x)$.

Figuur 1 illustreert hoe de verwachting van een verdisconteerd inkomen kan variëren afhankelijk van de lengte T van de snijcyclus voor verschillende waarden van de snijdiameter, die overeenkomen met $i = 1, \dots, 4$. De meest rechtse curve is die met $i = 1$ (duidelijke en gelijkmatige plot). De optimale strategie is $T^* \simeq 9,5$ en $i = 2$, dat wil zeggen door alles te knippen T^* jaar oude dode bomen en levende bomen $2T^*$ of meer. Merk op dat alle curven negatief worden wanneer T 0 nadert vanwege de niet-nul vaste kosten per oogst. De parameterwaarden die voor dit cijfer worden gebruikt, zijn $\alpha = 0,05$ per jaar (levensverwachting van bomen is $1/\alpha = 20$ jaar), $\tau = 10$ jaar (dit is de leeftijd waarop de groei het snelst is) en $\gamma = 2$ voor de groei-curve een disconteringsfactor $\beta = 0,03$ kosten per jaar $c/(PV_{\infty}) = 0$ en $c'/(NPV_{\infty}) = 0,1$, en een maximale waarde van de genormaliseerde plot $NPV_{\infty} = 1$.



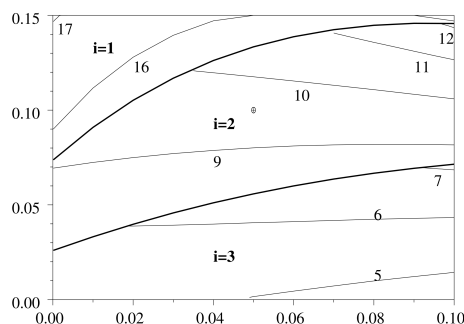
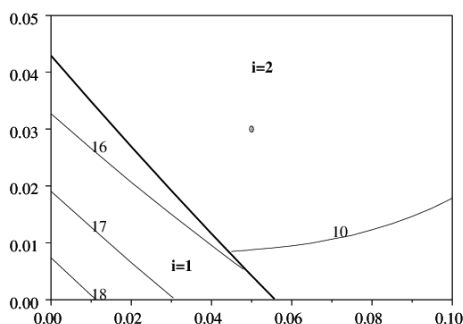
Figuur 1. Verwachting van verdisconteerd inkomen als functie van de lengte van de snijcyclus T voor verschillende waarden van de snijdiameter (die overeenkomen met $i = 1 \dots 4$).

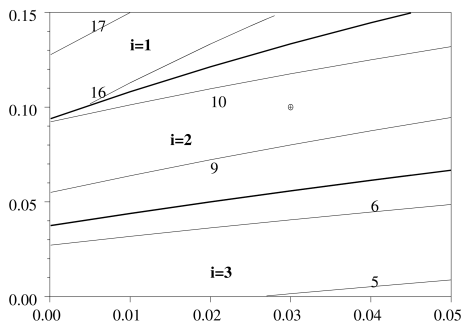
Figuur 2 illustreert hoe de optimale snijcyclus en diameter variëren afhankelijk van sterfte α , de discontovoet β en de vaste kosten per oogst. De waarden voor de vaste parameters zijn hetzelfde als in Figuur 1. Zoals verwacht, is ongelijkmatig beheer met een korte snijcyclus (weergegeven door de gebieden $i = 2$ en $i = 3$) winstgeverder dan even oud beheer ($i = 1$)

- bij een hoge sterfte (cijfers linksboven en rechtsboven),
- als de kortingsfactor hoog is (cijfers boven links en onderaan),
- of wanneer de vaste kosten per oogst laag zijn (rechtsboven en onderaan).

Let op in de figuur linksboven (resp. Rechtsboven) dat zelfs binnen de limiet $\alpha \rightarrow 0$ (in het geval van Faustmann's model) wordt ongelijkmatig beheer winstgeverder dan even oud beheer als het discontopercentage (resp. de vaste kosten per oogst) boven (resp. onder) een bepaalde drempel ligt.

Figuur 2 toont ook de contourlijnen voor de optimale lengte van de snijcyclus. Merk op dat er geen eenvoudige relatie is tussen de optimale lengte van de snijcyclus en sterfte: de eerste kan een toenemende of afnemende functie van de tweede zijn, afhankelijk van de waarden van de parameters, zoals in de figuur hierboven Rechtsaf.





Figuur 2. Optimale cyclustlengte en diameter wanneer de sterfte α varieert, de discontovoet β en de vaste kosten per oogst c' . Linksboven: diagram (α, β) . Rechtsboven: diagram $(\alpha, c'/NPV_\infty)$. Onderkant: diagram $(\beta, c'/NPV_\infty)$. De vetgedrukte lijnen scheiden de gebieden waar $i = 1$ (zelfs beheer is optimaal) van gebieden waar $i = 2$ en $i = 3$ (ongelijk beheer is optimaal). De andere lijnen zijn de nivellijnen voor de optimale lengte van de snijcyclus. In elk geval roept een punt de waarden op van de parameters in figuur 1.

4. Grensgevallen en uitbreidingen

Als we de kritische diameter D van het kappen van levende bomen op 0 zetten (kappen), dan is de overeenkomstige leeftijd $X = 0$. Dus $i = 1$ en formule (1) wordt teruggebracht tot

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

Als daarnaast de vaste kosten per oogst c' en de sterfte α is verwaarloosbaar, dan worden de formules gereduceerd tot die van Faustmann [2,3]

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

Een ander grensgeval wordt verkregen als de kortingsfactor β en de lengte van de snijcyclus T convergeren naar 0, wat overeenkomt met kijken naar het gemiddelde inkomen met een continue oogst van dode bomen en levende bomen waarvan de leeftijd gelijk is aan groter dan x . Denk aan het verband tussen het gemiddelde inkomen per jaar en het verdisconteerde inkomen op alle toekomstige gewassen:

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

Laten we houden $c' = 0$. Formule (1) geeft dan het gemiddelde inkomen

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

en de dichtheden $p(x, t)$ en $q(x, t)$ komen samen op stationaire oplossingen

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

en $\hat{q}(x) = 0$. De formule (2) is dezelfde als in [6] voor het gemiddelde inkomen in bossen met een catastrofaal brandrisico. Inderdaad, als $T \rightarrow 0$, er is geen vertraging tussen de dood van de boom en zijn oogst, zoals in [6]. Het is dus normaal dat het gemiddelde inkomen hetzelfde is. De synchronisatie van sterfgevallen bij brand leidt echter tot een verschil in de uiting van verdisconteerd inkomen.

Extensies. Stel dat sterfte, in plaats van constant te zijn, afhankelijk is van leeftijd. Laten we definiëren

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

Als Q de prijs is van dood hout, als P de prijs is van recent gesneden groen hout, dan is de verwachting van een verdisconteerd inkomen op alle toekomstige oogsten

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

met $i = [X/T] + 1$. Formule (1) komt overeen met $Q = P$ en met constante α , zodat $\Delta(x) = \exp(-\alpha x)$. In de limiet waar $\beta \rightarrow 0$ en $T \rightarrow 0$, deze formule (met $c' = 0$) leidt tot gemiddeld inkomen

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

een formule die men vindt in [6] in de context van bossen met brandgevaar maar waar een deel van het verbrande hout kan worden teruggewonnen.

5. Conclusie

In het kader van een eenvoudig model is een formule gevonden optimale lengte van de snijcyclus en de diameter bij het beheer bestaat uit het snijden van dode en levende bomen met een diameter groter dan D om T jaar. Dit model is ontworpen voor bossen met een hoge natuurlijke sterfte, waarbij dode bomen het grootste deel van de oogst vormen en worden gebruikt als brandhout. We hebben gezien dat ongelijk beheer onder deze omstandigheden gunstiger was. Wanneer de natuurlijke sterfte laag is, de discontovoet laag is of de vaste kosten per oogst hoog, kan zelfs beheer winstgevender zijn.

Het bosbeheer in Niger en andere Sahel-landen staat nog in de kinderschoenen. Rotatie is pas tien jaar geleden geïntroduceerd. Veldgegevens zijn nog steeds schaars. Ondanks de talrijke onderzoeken die in meer dan 150 jaar zijn verzameld naar het probleem van optimale rotatie in ontwikkelde landen, is aanpassing aan lokale omstandigheden noodzakelijk. In deze studie richten we ons op slechts één aspect, namelijk een hoge natuurlijke sterfte. Laten we hopen dat dit micro-economische model zal worden gecombineerd met macro-economische modellen [17,18,19] om de publiekstrekkingen een completer modelleerinstrument te bieden.

Bedankt

De tweede auteur bedankt Édith Perrier (IRD), Alain Bertrand, Martine Antona, Christophe Le Page (CIRAD) en Aboubacar Ichaou (Ministerie van Milieu van Niger). Dit artikel is opgedragen aan de nagedachtenis van Ovide Arino.

Bibliografische referenties

1. J. M. d'Herbès, 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. Gilles, *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*, Thèse, Université de Toulouse III, 2000.
14. 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
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
18. www.dec.org/pdf_docs/PNACQ877.pdf
19. MARGE, *Le modèle GLOBUS*, www.marge.fr