

# brandhout oogsten Niger en generalisatie van de formule 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 in Niamey  
Faculteit der Natuurwetenschappen, Departement Biologie, PO Box 10662 Niamey, Niger

## Overzicht

In bepaalde 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 bospercelen ongelijke vatbaar voor een hoog sterftecijfer  $\alpha$ , en krijgen we een formule voor de cyclus en het snijden diameter dat de bijgewerkte inkomsten te optimaliseren met 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 op markten sluiten met administratieve vergunning. Een differentieel belastingstelsel moedigt handelaren aan om brandstofhout van deze constructies te kopen in plaats van het ongecontroleerd oogsten van bossen te organiseren [1].

Twee systemen werden gekozen. In "georiënteerde plattelandsmarkten" worden alleen dode bomen geoogst. In de "gecontroleerde plattelandsmarkten" worden ook enkele levende bomen gekapt en wordt de kap cyclisch 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 te wijten aan zijn bestemming minder vaak voor (het dode hout is beter dan groen hout om eten te koken), gebrek aan verwerking en beschikbaarheid (de Sahel klimaat veroorzaakt hoge boom sterfte).

Ondanks 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 ongelijkmatige leeftijd die gevoelig zijn voor hoge sterfte, waarbij dode bomen het grootste deel van de oogst vormen om als brandhout te worden gebruikt. In [6] wordt een expliciete formule verkregen maar gelijkjarige bossen gevoelig voor katastrofisch sterfte vanaf vuur. Het model continu variabele tijd en de samenstelling werd verkregen door de theorie van vernieuwing processen beloning. Benadrukt moet worden dat bij een hoge natuurlijke sterfte, individuele bomen gaan van tijd tot tijd dood en er kan een vertraging optreden voordat ze worden gekapt in 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 dat 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 is gebruikt in [8] in combinatie met een matrixmodel in discrete tijd gelijk aan [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 dan ook om, binnen het kader van een eenvoudig oneffen oud perceelmodel met hoge mortaliteit, een expliciete formule te vinden voor de duur van de optimale cyclus en de optimale snijdiameter. De optimalisatie criterium is hetzelfde als in het model Faustmann, namelijk de bijgewerkte inkomsten 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 zou de interesse kunnen verschuiven van hoe het bos te beheren naar hoe het beheer te optimaliseren.

Het artikel is als volgt ingedeeld. In hoofdstuk 2 introduceren we de notatie 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). Ook blijkt dat de formule voor de gemiddelde opbrengst van gelijkjarige standplaatsen waar lage mortaliteit maar katastrofisch zoals branden, vermeld in [6], komt overeen met de grenzen van een snijcyclus  $T \rightarrow 0$  met een discontovoet  $\beta \rightarrow 0$ . Ook andere uitbreidingen van de formule worden gepresenteerd: naar een leeftijdsafhankelijke sterfte en een mogelijk prijsverschil tussen dood hout en recent gekapt groen hout. Ze kunnen worden gebruikt in een andere context.

## 2. Een eenvoudig model

We gaan ervan uit:

- 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 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
- $c'$  een vast bedrag per gewas
- $\alpha$  is de sterfte van de bomen: gedurende een klein tijdsinterval  $dt$ ,  $\alpha dt$  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). Voorlopig gaan we ervan uit dat  $\alpha$  onafhankelijk is van leeftijd, maar deze aanname wordt in paragraaf 4 losgelaten.
- de lengte 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 bereikt de diameter  $D$ .

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 verwaarloosbaar is tijdens rotatie. Laat tenslotte  $\beta$  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 hoop van de bevolkingsdichtheid van dode bomen leeftijd  $x$  op tijdstip  $t$  (wanneer zij sterven, de bomen stoppen met groeien oud)
- $K_n$  is de verwachting van inkomen van oogst tot tijd  $t = nT$ .

Het probleem kan worden geformuleerd als een stelsel 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 benadering is bijvoorbeeld die van [15,16], waar de oogst continu en niet periodiek is. Tussen oogsten ( $nT < t < (n+1)T$ ), Function check

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

en  $p(0, t) = 0$ . Als  $nT^-$  en  $nT^+$  respectievelijk aanduiden "net voor  $t = nT$ " en "net na  $t = nT$ ", 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,  $\delta_{x=0}$  is massa Dirac  $x = 0$ , terwijl  $\mathbf{1}_{x \in ]0, X[}$  geeft de karakteristieke functie van het interval  $]0, X[$ . 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 het verdisconteerde 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. Snij cyclus optimale diameter

Ongeacht de leeftijdsopbouw van de beginconditie, de dichtheden  $p(x, t)$  en  $q(x, t)$  als Converge  $t \rightarrow +\infty$  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  $\hat{q}(x, nT^+) = 0$ , waar  $i = [X/T] + 1$  (en  $[X/T]$  is het hele deel van  $X/T$ ). Merk op dat als  $X < T$  (dus dat  $i = 1$ ), alle levende bomen die bereiken  $t = nT^-$  zijn van dezelfde leeftijd (zelfs plot) en worden geoogst op  $t = nT$  tegelijk met de dode bomen (kaal). Integendeel, als  $X > T$  (dus dat  $i \geq 2$ ), levende bomen die reiken  $t = nT^-$  zijn oud  $T, 2T, \dots, iT$  (oneffen perceel) en alleen degenen die verouderd zijn van  $iT$  worden geoogst op  $t = nT$  met dode bomen (selectie). Dus het geheel  $i$  vertegenwoordigt 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  $iT$ - leeftijd. 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  $X$ . Op equivalente wijze moet de maximale relatieve worden gevonden voor  $T$  en de gehele  $i = \lfloor X/T \rfloor + 1$ . Het is de veralgemening van de klassieke Faustmann-formule voor het beschouwde management (zoals we in de volgende sectie zullen zien). Om het aantal parameters van de discussie te beperken, schrijf de formule

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

waar  $V_{\infty}$  is het maximale volume dat een boom tijdens zijn levensduur kan bereiken. er rekening mee dat

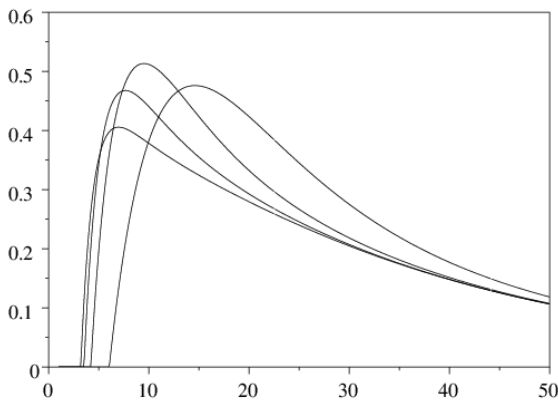
- $c/(PV_{\infty})$  is de verhouding tussen de kosten van het kappen en herplanten van een boom enerzijds en de maximale waarde van een boom anderzijds
- $c'/(NPV_{\infty})$  is de verhouding tussen de vaste kosten per oogst en de maximale waarde van een perceel.

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  $\Gamma$  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 deze figuur 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  $NPV_{\infty} = 1$ .



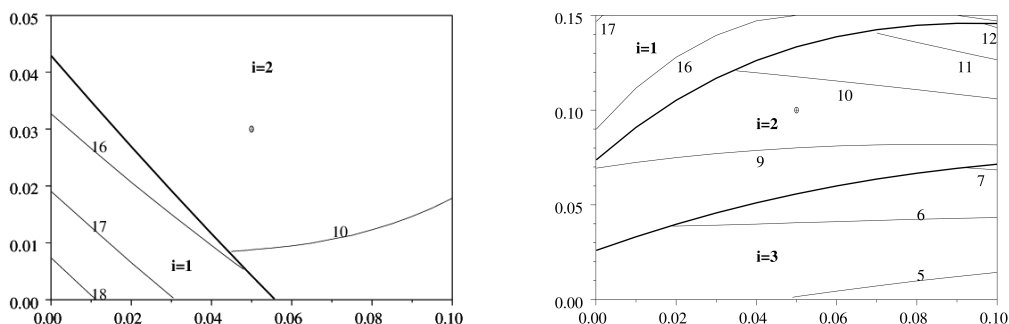
Figuur 1. Verwachting van verdisconteerd inkomen als functie van de lengte van de snijcyclus  $T$  voor verschillende waarden van de snijdiameter (die overeenkomen met  $i = 1 \dots 4$ ).

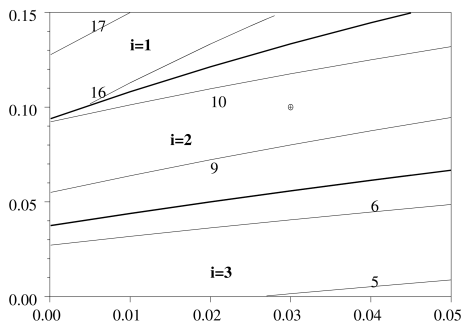
Figuur 2 illustreert hoe de optimale snijcyclus en diameter variëren met sterfte  $\alpha$ , de discontovoet  $\beta$  en de vaste kosten per oogst. De waarden voor de vaste parameters zijn hetzelfde als in figuur 1. Zoals verwacht, zijn ongelijksoortige managements met een korte snijcyclus (weergegeven door de zones  $i = 2$  en  $i = 3$ ) winstgevender dan zelfs managements ( $i = 1$ )

- bij een hoge sterfte (cijfers linksboven en rechtsboven),
- wanneer de kortingsfactor hoog is (cijfers linksboven 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 winstgevender 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 bij klopt.





Figuur 2. Optimale cyclustlengte en diameter wanneer de sterfte  $\alpha$  varieert, de disconteringsvoet  $\beta$  en de vaste kosten per oogst  $c'$ . Linksboven: diagram  $(\alpha, \beta)$ . 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 van de parameters in figuur 1 op.

## 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  $X = 0$ . Aldus  $= iI$  en de formule (1) reduceert 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  $\alpha$  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  $\beta$  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 oogsten:

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

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 uitging 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

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

waar  $i = \lceil X/T \rceil + 1$ . Formule (1) komt overeen met bij  $Q = P$  en  $\alpha$  constant, zodat  $\Delta(x) = \exp(-\alpha x)$ . In de limiet waar  $\beta \rightarrow 0$  en  $T \rightarrow 0$ , deze formule (met  $c' = 0$ ) leidt tot het gemiddelde 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 voor de optimale lengte en diameter van de snijcyclus wanneer het management bestaat uit het kappen van dode bomen en levende bomen met een diameter groter dan  $D$  elke  $T$  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 onder deze omstandigheden het onevenwichtig beheer 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 dit onderzoek 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 een vollediger modelleerinstrument voor openbare deductoren te bieden.

## Dankwoord

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.

## 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](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 modèle GLOBUS*, [www.marge.fr](http://www.marge.fr)