Vall E., Andrieu N., Chia E., Nacro H. B. (éditeurs scientifiques), 2012. Partenariat, modélisation, expérimentation : quelles leçons pour la conception de l'innovation et l'intensification écologique. Actes du séminaire ASAP, novembre 2011, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso, Cédérom.

Un outil simple de projection démographique pour estimer la productivité d'un cheptel : application à un cheptel bovin de la zone cotonnière au Mali-Sud

Alassane BA*, Matthieu LESNOFF**, Doubangolo COULIBALY*, René CHAPUIS-POCCARD**, Charles-Henri MOULIN***

*IER, CRRA de Sikasso, Sikasso, Mali

**CIRAD, UMR SELMET, F-34398 Montpellier, France

***SupAgro, UMR SELMET, 34060 Montpellier, France

Résumé — Un outil simple de projection démographique pour estimer la productivité d'un cheptel. L'article présente une interface développée sous forme de feuilles de tableur, appelée Dynmod (http://livtools.cirad.fr), permettant de réaliser des projections démographiques de cheptel de ruminants et d'estimer leur productivité. Après la présentation de quelques concepts de base, l'article illustre l'utilisation de l'outil par une analyse de sensibilité sur la productivité numérique du cheptel bovin de la zone cotonnière au Mali-Sud.

Introduction

L'augmentation de la productivité des troupeaux des élevages traditionnels de ruminants est une voie importante pour répondre à la demande croissante des pays d'Afrique subsaharienne en produits animaux. Devant cet enjeu et afin de faciliter les prises de décisions, il est nécessaire de disposer de bons indicateurs et d'outils pour pouvoir estimer les effets d'interventions zootechniques ou sanitaires sur la productivité des troupeaux (e.g. au cours d'expérimentations en milieu villageois) ou les prédire dans des études *ex ante*. Ce n'est pas simple car la productivité d'un cheptel est la résultante de nombreux processus biotechniques dont les effets peuvent se cumuler ou s'opposer. De nombreuses définitions et approches d'estimation ont été proposées pour la productivité des troupeaux d'élevage extensif (Lesnoff, 2011). L'approche que nous présentons dans cet article utilise les modèles démographiques matriciels. Ces modèles prennent en compte l'ensemble du cycle de vie des animaux vivant dans les troupeaux, et non pas simplement quelques phases particulières comme le font des indicateurs tels que les taux de productivité au sevrage. Ils tiennent compte des flux d'animaux au sein des troupeaux, des variations du stock animal et permettent d'estimer des productivités globales de troupeaux dans des contextes stables ou variables avec le temps (McIntire, 1988 ; Baptist, 1992; Itty,1995). La construction et la manipulation des modèles démographiques peuvent être compliquées pour les non spécialistes. L'article présente une interface développée sous forme de feuilles de tableur, appelée Dynmod (Lesnoff, 2010), facilitant la mise en œuvre de ces modèles pour simuler la productivité ou la dynamique de cheptels domestiques. Après la présentation de quelques concepts de base, l'article illustre l'utilisation de l'outil par une analyse de sensibilité sur la productivité du cheptel bovin du sud du Mali (Ba, 2011 ; Ba *et al.,* 2011).

Modèle démographique matriciel et estimation de la productivité

Modèles matriciels

Les modèles matriciels font partie des modèles à compartiments (e.g. Lebreton & Millier 1982; Jolivet 1983 ; Pavé 1994), qui représentent des flux de matière ou d'individus entre compartiments connectés. Pour les cheptels, les compartiments des modèles représentent des catégories d'animaux : par exemple le

sexe des animaux, des classes d'âge ou des stades physiologiques. Le « cheptel » peut représenter un ensemble de troupeaux (« population » animale) ou le troupeau moyen pour un type de ménage donné. Des équations mathématiques définissent les transitions des animaux entre les compartiments au cours du temps. Le temps est représenté par une échelle discrète : les transitions entre les compartiments se produisent d'un temps t à un temps t+1. Dans la forme la plus simple des modèles, la dynamique du cheptel est donnée par l'équation :

$$x(t+1) = A \times x(t)$$

où $x(t)$ représente un vecteur d'effectifs d'animaux présents au temps t dans les différentes catégorie d'animaux et A une matrice contenant les taux démographiques des différentes catégories : taux de reproduction, de mortalité naturelle et d'exploitation (abattages, ventes, etc.). Les propriétés mathématiques et les nombreuses applications de ce type de modèle ont été largement étudiées et décrites par ailleurs (Caswell, 2001).

Productions à l'équilibre

L'approche des modèles de « productions à l'équilibre » (en anglais « steady-state models ») est apparue en élevage tropical à partir des années 1985, notamment sous l'impulsion de Upton (Upton, 1985a ; Upton, 1985b ; Upton, 1986 ; Upton, 1989 ; Upton, 1993). Cette approche consiste à estimer, à l'aide d'un modèle matriciel, la production annuelle P d'un cheptel supposé en équilibre démographique, c'est-à-dire dont la taille et la structure sont constantes. Les modèles de production à l'équilibre ont été très utilisés pour estimer l'effet d'interventions zootechniques sur la productivité des cheptels de petits ruminants ou de bovins (changement de régimes alimentaires, de conduites d'élevages, de stratégies d'exploitation des animaux, etc), et/ou d'interventions sanitaires (e.g. Upton, 1985b ; Cossins & Upton, 1988 ; Richard Baptist, 1990 ; Ankers *et al.,* 1998).

Le principe est le suivant. L'équilibre démographique est défini par un vecteur d'effectifs d'animaux (x) supposé représenter l'état initial et l'état final du cheptel. Ceci revient à poser :

$$x(t) = x(t+1 \text{ an}) = x$$

Les taux de reproduction et de mortalité des différentes catégories d'animaux, fixés d'après des hypothèses ou des estimations issues de données d'enquêtes, sont placés dans la matrice de projection A, supposée constante avec le temps. Les taux d'exploitation contenus dans la matrice A sont ensuite calculés de manière à atteindre l'équilibre, c'est-à-dire :

$$A \times x = x$$

Le résultat du calcul est un vecteur y dont les composantes représentent les effectifs d'animaux exploités annuellement dans les différentes catégories d'animaux (y peut être négatif si les performances démographiques du cheptel sont insuffisantes pour assurer le renouvellement naturel du cheptel). La « production du cheptel à l'équilibre » en effectif d'animaux est estimée par :

$$P = \sum_i y_i$$

ou i représente l'indice des catégories d'animaux. Cette production est « conditionnelle » au vecteur x posé comme hypothèse initiale car P peut varier si le vecteur x est modifié.

La production P peut être estimée en d'autres unités que des effectifs d'animaux, avec par exemple la formule suivante :

$$P = \sum_i (w_i \times y_i)$$

où w est une variable de pondération : poids vif ou métabolique, UBT, valeur monétaire, énergie MJ, etc. P peut également cumuler la production primaire (variable y) et des productions secondaires (variables z ci-dessous : lait, fumure, etc.) :

$$P = \sum_i (w_{0i} \times y_i) + \sum_i [(w_{1i} \times z_{1i} + \ldots + w_{Ki} \times z_{Ki}) \times x_i]$$

La productivité annuelle peut être finalement estimée par :

$$P / \overline{n}$$

où $\overline{n}$ représente la « taille » moyenne du cheptel dans l'année pouvant, comme P, être exprimée en différentes unités.

Les modèles de production à l'équilibre ont de nombreux avantages par rapport à certaines démarches empiriques d'estimation de la productivité qui biaisent les résultats (Lesnoff, 2011). Sans les détailler ici, un avantage majeur est de permettre de comparer la productivité de cheptels sur une base commune, définie par le vecteur *x*.

Rendement numérique

Lorsque P et la taille moyenne du cheptel sont exprimées en effectifs d'animaux, le taux de productivité numérique $P / \overline{n}$ correspond au « rendement numérique » R_n du cheptel (SEDES, 1975; Lhoste *et al.,* 1993). Dans le présent article, nous utilisons également le terme de « potentiel exploitable » car R_n quantifie ce que les performances du cheptel permettent de « mettre à disposition » des éleveurs pour l'exploitation. Par exemple, un taux R_n = 7 % signifie que le troupeau produit annuellement environ 7 % de sa taille (en effectifs d'animaux), production que l'éleveur peut utiliser ou non sous forme d'exploitations. Si le taux d'exploitation moyen annuel dépasse R_n, le cheptel décroit et vice-versa.

Un outil simple de projection démographique : Dynmod

Dynmod (Lesnoff, 2010) est une interface développée sous MS Excel permettant de réaliser des projections démographiques. L'outil a été initié en collaboration avec l'ILRI puis amélioré lors de projets de recherche successifs menés par le Cirad. Dynmod est basé sur un modèle démographique simplifié dans lequel les classes d'âge sont agrégées en trois groupes (au sein de chaque sexe) : les « juvéniles », les « subadultes » et les « adultes ». L'utilisateur fixe lui-même la durée des groupes d'âge. Ceci permet de représenter aussi bien des petits ruminants que des grands ruminants, voire également des volailles.

Les simulations démographiques sont effectuées sur une base mensuelle puis les résultats sont agrégés au niveau annuel pour faciliter leur interprétation. La version actuelle de Dynmod contient trois modules (c.-à-d. des feuilles) représentant trois scénarios distincts (Lesnoff, 2010). Steady1 simule la production annuelle d'un cheptel en état démographique stable, mais pas forcément à l'équilibre : la structure sexe-âge est supposée constante, le taux de croît annuel peut être positif ou négatif, mais il est lui aussi supposé constant. Steady2 fait la même chose que Steady1 excepté que les effectifs d'adultes femelles et mâles sont supposés constants. Le taux de croît est donc nul. Par exemple pour les bovins, ce scénario peut représenter un troupeau dans lequel l'éleveur veut conserver un effectif constant de vaches et de mâles adultes (taureaux + bœufs). Enfin, PROJ simule la dynamique et la production d'un cheptel sur une période pouvant aller d'une à vingt années successives. Ce module permet de représenter un environnement variable (déterministe puisque les paramètres de chaque année sont rentrés manuellement), par exemple une succession d'années favorables ou défavorables (sécheresses, etc.).

Les trois interfaces fournissent des estimations du rendement numérique du cheptel et du taux de croît en fonction des taux démographiques fournis comme paramètres d'entrée. En plus des résultats démographiques, Dynmod peut fournir des résultats sur les poids vifs, les productions en viande et les productions secondaires (lait, cuirs et peaux, fumure) du cheptel, ainsi que des informations économiques pouvant être intégrées dans des analyses plus globales. Une copie de l'interface Steady1 est présentée comme exemple en annexe 1.

Illustration : analyse de sensibilité de la productivité numérique du cheptel bovin au Mali-Sud

L'élevage bovin dans la zone cotonnière au Mali-Sud

L'élevage occupe une place importante dans l'économie du Mali avec 9 % du PIB national sur la période 1990 à 2002 (Alary, 2006 ; Pradère, 2007 ; Samaké *et al.,* 2007). Les sécheresses successives, surtout celles des années 1970 et 1980, ont fortement affecté le cheptel dans la zone sahélienne. A la même période l'activité d'élevage s'est développée dans la partie sud du pays, plus humide et disposant de plus de ressources fourragères. La zone cotonnière est ainsi considérée aujourd'hui comme la deuxième zone d'élevage bovin du Mali. L'accumulation et la concentration soudaine des effectifs de bovins est supposée consécutive aux phénomènes de migration et de sédentarisation des populations et des animaux de la zone nord et à l'achat des animaux grâce aux revenus tirés de la culture de rente, le coton (Direction nationale des productions et industries animales, 2010). Dans la région administrative de Sikasso par exemple, d'après les statistiques officielles, les effectifs de bovins seraient passés de 7 % de l'effectif national en 1961 à 16 % en

2010, soit 1 376 781 têtes. Cette situation pose aujourd'hui des questions d'adaptation de la charge animale à la disponibilité en espace et en ressources alimentaires dans la zone.

Malgré ces constats ou hypothèses, les caractéristiques démographiques des troupeaux bovins dans la zone cotonnière au Mali-Sud ont été très peu étudiées. L'une des hypothèses les plus fréquemment rencontrées ces dernières années est une augmentation des stocks d'animaux sur pieds en raison de processus de thésaurisation de la part des éleveurs (sous-exploitation des animaux), bien que cette hypothèse n'ait pas encore été questionnée de manière objective. Dans ce contexte, une thèse de doctorat (Ba, 2011) coordonnée par Montpellier SupAgro et le CIRAD a été menée entre 2008 et 2011 pour réaliser un premier diagnostic sur la productivité numérique des troupeaux de la zone et les stratégies d'exploitations des animaux menées par les éleveurs. Cet article ne présente qu'un court extrait des résultats de cette étude, et est centré sur l'analyse de sensibilité du potentiel exploitable du cheptel de la zone et ses marges de progressions. Des résultats plus détaillés ont été publiés dans Ba *et al.* (2011).

Données

Les données de terrain ont été collectées dans le cadre d'un projet de recherche (PASE) sur la caractérisation des systèmes agraires de la zone cotonnière au Mali-Sud (Poccard-Chapuis *et al.,* 2007), coordonné par l'Institut d'économie rurale du Mali (IER) et le Cirad. Un échantillon de 95 troupeaux bovins (en moyenne 2 100 animaux) a été suivi mensuellement entre juin 2006 et juin 2007. Les troupeaux étaient situés dans huit villages répartis sur un gradient nord-sud de la zone cotonnière au Mali-Sud (pluviométrie 600 à 1 200 mm/an).

Lors de chaque visite, les enquêteurs recensaient tous les animaux présents dans les troupeaux ainsi que tous les événements survenus depuis la dernière visite : sorties du troupeau (mortalités naturelles, abattages, ventes, départs en prêts, etc.) et entrées dans le troupeau (naissances, achats, arrivées de prêts, etc.). Les données ont été collectées par sexe et par classe d'âge : juvéniles (veaux et vêles), sub-adultes (génisses et taurillons) et adultes (vaches, taureaux et bovins de trait). La classe « juvéniles » représentaient les animaux d'âges exacts compris entre 0 et 1 an, la classe « sub-adultes » les animaux d'âges exacts compris entre >1 et 4 an, et la classe « adulte » les animaux d'âge exact > 4 ans.

Estimation du potentiel exploitable et analyse de sensibilité

Le potentiel exploitable R_n du cheptel bovin a été estimé avec le module Steady2 de Dynmod, fixant un taux de croît moyen nul pour les troupeaux. Un potentiel a tout d'abord été obtenu à partir des paramètres démographiques estimés d'après le suivi 2006-2007 (moyennes sur les 95 troupeaux) : structure sexe-âge des troupeaux et taux de reproduction et de mort naturelle présentés au Tableau 1. Une analyse de sensibilité de R_n a ensuite été effectuée en faisant varier les taux de mise bas et de mortalité un à un selon une gamme de variation donnée (Tableau 1).

Tableau 1. Paramètres démographiques utilisés dans le modèle démographique Steady2 (valeurs moyennes estimées d'après les données collectées sur le terrain et gammes de variation pour l'analyse de sensibilité).

Paramètre	Sexe[(a)]	Classe d'âge[(b)]	Valeurs moyennes	Gamme de variation
Structure sexe-âge (%)	F	J	11	–
		SA	13	–
		A	31	–
	M	J	11	–
		SA	12	–
		A	22	–
Taux de mise bas (/vache/an)	F	A	0.53	0,30-0,80
Taux de mort naturelle (%)	F+M	J	12	1-40
		SA	4	1-40
		A	3	1-40

(a) En âge exact : J = Juvéniles (0 à 1 an), SA = Sub-adultes (>1 à 4 ans), A = Adultes (>4 ans)
(b) Sexe : F = Femelle, M = Mâle.

Résultats

Le potentiel exploitable moyen pour le cheptel bovin de la zone cotonnière au Mali-Sud a été estimé à R_n = 11 % (i.e. les éleveurs peuvent exploiter chaque année environ 11 % de leur cheptel sans entamer leur stock).

R_n a varié de 8 % à 14 % pour des taux de mise bas allant de 0,30 / an à 0,80 / an (Figure 1-a). Pour la mortalité naturelle, la sensibilité de R_n a été très différente selon les classes d'âge (Figure 1-b). Les adultes ont constitué la classe d'âge la plus influente : R_n a varié de 12 % à –12 % pour des taux de mort allant de 1 % à 40 % an, alors qu'il n'a varié que de 12 % à 8 % pour la classe des juvéniles.

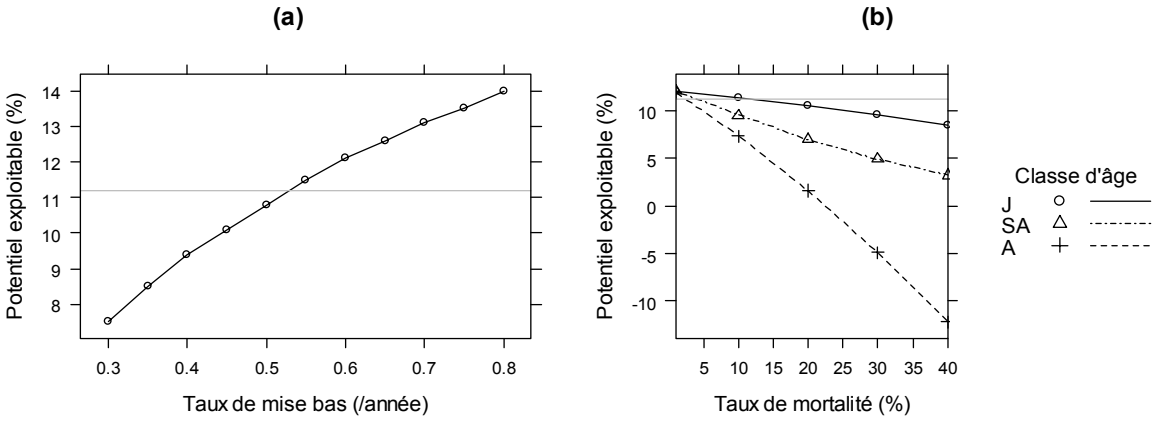


Figure 1. Variation du potentiel exploitable du cheptel R_n en fonction (a) du taux annuel de mise bas des femelles adultes, et (b) du taux annuel de mortalité naturelle des juvéniles (J), des sub-adultes (SA) et des adultes (A).

Discussion et conclusion

Productivité numérique au sud du Mali

La productivité numérique estimée pour le cheptel bovin au Mali-Sud (11 %) est proche de la valeur moyenne de la gamme de variation rencontrée pour les cheptels bovins des zones semi-arides (entre 5 et 15 % en général). Pour l'année de suivi considérée (juin 2006 – juin 2007), le taux d'exploitation global du cheptel a été estimé à 8 % (Ba *et al.,* 2011), ce qui a engendré un taux de croît annuel de 3 % pour les troupeaux suivis dans l'échantillon. L'échantillon était de taille insuffisante pour que cette estimation du taux de croît soit représentative de l'ensemble du cheptel de la zone cotonnière au Mali-Sud. Par ailleurs l'estimation ne concerne qu'une seule année alors que le taux de croît peut présenter de fortes variations interannuelles. Des incertitudes élevées persistent ainsi sur la dynamique actuelle du cheptel bovin du Mali-Sud. Des dispositifs de terrains plus ambitieux, basés sur des inventaires directs d'animaux répétés à plusieurs années d'intervalle, sont nécessaires pour mieux cerner cette dynamique. Des incertitudes persistent également sur l'estimation du taux R_n car les taux de reproduction et de mortalité sont eux aussi soumis à de fortes variations interannuelles, notamment en relation avec des facteurs environnementaux (disponibilités en fourrage, maladies, etc.). Des suivis de troupeaux pluriannuels sont nécessaires pour appréhender cette variabilité interannuelle. La mise en place de tels dispositifs serait particulièrement importante pour valider l'estimation du taux annuel de mise bas moyen des vaches dans la zone, paramètre fortement influent sur la productivité numérique des cheptels (Ba *et al,.* 2011 ; Lesnoff, 2011).

D'après l'analyse de sensibilité, il ne semble pas falloir attendre d'amélioration du potentiel exploitable R_n par une réduction de la mortalité naturelle. Les mortalités estimées dans la zone étaient déjà assez faibles (12 % pour les jeunes et < 5 % pour les plus âgés) et semblent indiquer qu'il n'y a pas de problèmes sanitaires majeurs dans la zone. La Figure 1-b montre cependant que des mortalités plus importantes dans l'avenir, dues par exemple à des dégradations sanitaires, pourraient sérieusement diminuer le potentiel exploitable, allant jusqu'à des productivités négatives si la mortalité des adultes dépasse 20 % par an. Il apparaît donc important de maintenir des actions de préventions sanitaires dans la zone.

Les vaches de la zone d'étude ont montré des taux de reproduction faibles, avec des taux de mise bas de 0,53 / vache / an alors qu'en conditions améliorées les vaches zébus peuvent atteindre des taux de 0,70 / vache / an à 0,80 / vache / an (Mukasa-Mugerwa, 1989). Ces faibles performances reproductrices ont fortement impacté le potentiel exploitable R_n. L'analyse de sensibilité (Figure 1) a montré qu'une amélioration du taux de mise bas permettrait d'augmenter significativement le potentiel exploitable.

Cette estimation est même probablement sous-évaluée car l'âge à la première mise bas a été supposé constant dans la simulation démographique, alors qu'une meilleure alimentation des femelles en plus d'augmenter le rythme des mises bas a pour effet d'augmenter la précocité. L'amélioration des performances de reproduction, qui passe essentiellement par de meilleures conditions d'alimentation des femelles, parait donc être une voie à recommander.

Cependant, un autre résultat majeur de l'étude est que la productivité numérique du cheptel est fortement contrainte par la faible proportion de femelles (55 %) dans le cheptel, et en particulier de femelles reproductrices (31 %). Dans un cheptel, les femelles adultes sont le « moteur » de la démographie : leur proportion influe beaucoup sur le renouvellement naturel des troupeaux et sur la production d'animaux. Les faibles proportions de femelles dans un cheptel sont caractéristiques des zones d'agriculture-élevage dans lesquelles beaucoup de bovins de labours sont conservés par les éleveurs pour la traction animale (de Leeuw & Wilson, 1987; *Lesnoff et al.,* 2002). En comparaison, la proportion de femelles et de vaches dans certains élevages pastoraux peuvent atteindre respectivement près de 80 % et 45 %. Une analyse de sensibilité non détaillée dans cet article a par exemple montré que R_n passait de 11,2 % à 13,9% lorsque la proportion de vaches était fixée à 35 % au lieu de 31 %, et à 15,9 % lorsqu'elle était fixée à 39 %. De telles proportions de vaches permettraient donc d'augmenter fortement la production d'animaux dans la zone Mali-Sud. Etant donné le caractère multifonctionnel des troupeaux bovins dans la zone cotonnière (fumure, traction animale), une telle évolution semble cependant peu probable. Ceci pose d'ailleurs la question quant à la perspective d'augmenter significativement la productivité numérique du cheptel dans la zone cotonnière au Mali-Sud. D'autres composantes de la productivité (viande et lait) sont peut être à privilégier. Cette question plus vaste demande des études spécifiques complémentaires à cet article.

Estimation de Rn et Dynmod

Dans l'article, le taux R_n a été estimé à l'aide d'un modèle de production à l'équilibre (module Steady2 de Dynmod). Dans une étude introductive sur ce type de modèle, Upton (1989) discute de la légitimité de la contrainte d'équilibre $x(t+1) = x(t) = x$ qui, à juste titre, ne représente pas toujours un objectif de l'éleveur. Les modèles de production à l'équilibre peuvent cependant être étendus sans difficulté au cas non équilibré mais représentant un état stable de type :

$$x(t+1) = m \times x(t)$$

où m représente un taux de multiplication du cheptel « fixé comme objectif » (e.g. James & Carles, 1996 ; Lesnoff, 2000). Des simulations ont montré que les résultats des estimations de productivité étaient peu sensibles au choix de m (Lesnoff, 2000). Par ailleurs, une approche très similaire pour estimer R_n sans fixer m a priori est d'utiliser la formule :

$$R_n = (\Delta n + O - I) / \overline{n}$$

où Δn représentent la variation du stock présent dans le cheptel (entre la fin et le début d'année), O et I les animaux respectivement exploités (abattages, ventes, dons, etc.) et importés (achats, dons, etc.) dans le cheptel dans l'année ($O - I$ représente « l'exploitation nette ») et $\overline{n}$ la taille moyenne du cheptel sur l'année. Les variables Δn, O, I et $\overline{n}$ sont ici calculées d'après le modèle matriciel $x(t+1) = A \times x(t)$. Ces types d'estimations sont par exemple celles fournies dans les interfaces STEADY1 et PROJ de DYNMOD. En pratique, les écarts entre ces estimations et celles des modèles de production à l'équilibre sont quasiment toujours négligeables (résultats non publiés). En synthèse, l'hypothèse d'équilibre a très peu d'influence sur les estimations de R_n.

DYNMOD a l'avantage d'être un outil simple permettant de prédire rapidement la productivité et la dynamique d'un cheptel en fonction de paramètres démographiques fournis comme données d'entrée. Développé initialement à des fins pédagogiques, il a montré qu'il pouvait également être utile dans des démarches d'aides à la décision. Il permet de réaliser des diagnostics en *ex post* ou en *ex ante*, par exemple sur l'effet d'interventions zootechniques ou sanitaires, que ce soient des innovations ou des pratiques d'élevage déjà bien maîtrisées (e.g. complémentations, déparasitages, vaccinations, etc.). Cependant, l'outil est basé sur un modèle démographique très simplifié et déterministe. Par exemple, Dynmod permet de définir uniquement trois groupes d'âge. Ceci peut engendrer certains biais dans les estimations, notamment au niveau des structures d'âge (Lesnoff, 2011). Par ailleurs, DYNMOD ne réalise pas de simulations stochastiques et ne permet pas de réaliser des analyses de sensibilité « globales », c'est-à-dire dans lesquelles tous les paramètres sont randomisés conjointement (Saltelli *et al.,* 2008) à

l'aide de simulations Monte Carlo. Le développement de modèles démographiques plus élaborés nécessite d'utiliser des langages de programmation adaptés. Une bibliothèque de fonctions développée avec le logiciel gratuit R (R Development Core Team, 2011) est en cours d'élaboration au sein de l'unité de recherche Selmet du Cirad.

Bibliographie

ALARY V., 2006. Etude du commerce régional du bétail et des produits animaux en Afrique de l'Ouest (Zone ECOWAS) et Afrique de l'Est (Zone IGAD), Desk Review STDF 13, FAO/OIE, Montpellier, France: CIRAD (Centre de Coopération International de Recherche Agronomique pour le Développement).

ANKERS P. *ET AL.,* 1998. Biannual anthelmintic treatments in village Djallonke sheep in the Gambia: effects on productivity and profitability. *Preventive Veterinary Medicine*, 34(2-3), pp.215-225.

BA A., 2011. *Exploitation du cheptel bovin dans la zone cotonnière au Mali-Sud*. Thèse de Doctorat. Montpellier, France: Montpellier SupAgro.

BA A., LESNOFF, M. & MOULIN, C.H., 2011. Demographic dynamics and off-take of cattle herds in south Mali. *Tropical Animal Health and Production*, 43(6), pp.1101-1109.

BAPTIST R., 1992. Derivation of steady-state herd productivity. *Agricultural Systems*, 39, pp.253-272.

BAPTIST R., 1990. Simulated livestock dynamics—Effects of pastoral offtake practices and drift on cattle wealth. *Tropical Animal Health and Production*, 22(2), pp.67-76.

CASWELL H., 2001. *Matrix population models: construction, analysis and interpretation* 2nd ed., Sunderland, USA: Sinauer Associates.

COSSINS N.J. & UPTON M., 1988. Options for the improvement of the Borana pastoral system. *Agricultural Systems*, 27, pp.251-278.

ITTY P., 1995. Application of a bio-economic herd simulation model to African cattle production systems: implications for village milk production. *Q. J. Int. Agric.*, 34(4), pp.372-385.

James, A.D. & Carles, A.B., 1996. Measuring the productivity of grazing and foraging livestock. *Agricultural Systems*, 52(2-3), pp.271-291.

JOLIVET E., 1983. *Introduction aux modèles mathématiques en biologie*, Paris, France: Masson.

LEBRETON J.-D. & MILLIER C., 1982. *Modèles dynamiques déterministes en biologie*, Paris, France: Masson.

DE LEEUW P.N. & WILSON R.T., 1987. Comparative productivity of indigenous cattle under traditional management in sub-saharan Africa. *Quaterly Journal of International Agriculture*, 26(4), pp.377-390.

LESNOFF M., 2011. *Démographie et zootechnie tropicales : un lien par les modèles matriciels appliqués aux cheptels de ruminants dans les élevages extensifs. Mémoire de synthèse pour l'Habilitation à Diriger des Recherches. Université de Montpellier II, Ecole Doctorale SIBAGHE*, Montpellier, France: CIRAD (Centre de Coopération International de Recherche Agronomique pour le Développement).

LESNOFF M., 2010. *DYNMOD: A spreadsheet interface for demographic projections of tropical livestock populations - User's Manual*, Montpellier, France: CIRAD (French Agricultural Research Centre for International Development), ILRI (International Livestock Research Institute). http://livtools.cirad.fr. Available at: http://livtools.cirad.fr.

LESNOFF M., 2000. *Etude de la dynamique et de la productivité des populations domestiques tropicales par les modèles matriciels en temps discret: les populations d'ovins au Sénégal. Thèse de Doctorat*. Université de Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc.

LESNOFF M. *ET AL.,* 2002. Demographic parameters of domestic cattle in a contagious-bovine-pleuropneumonia infected area of Ethiopian highlands. *Revue d'Elevage et de Médecine véterinaire des Pays Tropicaux*, 55(2), pp.139-147.

LHOSTE P. *ET AL.,* 1993. *Manuel de zootechnie des régions chaudes - Les systèmes d'élevage*, Paris, France: Ministère de la Coopération, Collection Précis d'Elevage.

MCINTIRE J., 1988. Introduction to economic analysis in the African trypanotolerant livestock network. In

Livestock production in tsetse affected areas of Africa. The African trypanotolerant livestock network. Proceedings of a meeting held in 23-27 November 1987. Nairobi, Kenya: ILCA/ILRAD, pp. 350-359.

MUKASA-MUGERWA E., 1989. *A review of reproductive performance of female Bos Indicus (zebu) cattle*, Addis Ababa, Ethiopia: ILCA monograph no. 6, International Livestock Centre for Africa.

PAVE A., 1994. *Modélisation en biologie et en écologie*, Paris, France: Aléas.

PRADERE J.F., 2007. *Performances et contraintes de l'élevage au Mali. Projet d'Appui à l'Agriculture Africaine (P3A) au Mali*, MAE (Ministère des Affaires Etrangères).

R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2011. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*, Vienna, Austria. Available at: http://www.R-project.org.

SALTELLI, A. *ET AL.*, 2008. *Global sensitivity analysis: the primer*, Chichester England; Hoboken NJ: John Wiley.

SAMAKE A. *ET AL.*, 2007. *Les implications structurelles de la libéralisation sur l'agriculture et le développement rural au Mali. Première phase du programme Rural Struc – Synthèse nationale*, Bamako, Mali: CEPIA / Banque Mondiale et Coopération française.

SEDES, 1975. *Etude de la structure et de la dynamique des troupeaux bovins : méthodologie pratique*, Paris, France: Ministère de la Coopération.

UPTON M., 1989. Livestock productivity assessment and herd growth models. *Agricultural Systems*, 29, p.149-164.

UPTON M., 1993. Livestock productivity assessment and modelling. *Agricultural Systems*, p.459-472.

UPTON M., 1986. Modelling economic outcomes of livestock production systems. In *ILCA workshop on Modelling extensive livestock production systems*. Bet Degan, Israel: ILCA (International Livestock Center for Africa), Addis Ababa, Ethiopia, pp. 300-322.

UPTON M., 1985a. Models of improved production systems for small ruminants. In *Sheep and Goats in Humid West Africa*. International Livestock Centre for Africa, Addis Ababa, Ethiopia, p. 55-67.

UPTON, M., 1985b. Returns from small ruminant production in south west Nigeria. *Agricultural Systems*, 17, p.65-83.

Annexe 1 Interface du module Steady1 de Dynmod. L'interface Steady2 est identique, excepté que les effectifs des adultes femelles et mâles sont constants (le taux de croît est fixé obligatoirement à 0 % et les taux d'exploitation des adultes ne sont plus saisis, mais calculés directement par le modèle). Dans l'interface PROJ, les paramètres doivent être saisis pour chacune des années de la période de projection souhaitée. L'espace de saisie est composé de 20 colonnes (une colonne par année), la durée maximale de projection étant de 20 ans. Des animaux peuvent également être importés en cours de projection.

