

Modélisation dynamique de la population bovine en Tunisie: Reconstitution du troupeau et estimation de la production de viande

MOHAMED JAOUAD*, ALI SALMI**, MOHAMED ALI BEJI**

Jel classification: Q 180, Q 120

Introduction

Dans le cadre de la nouvelle conception du développement global du pays, la stratégie de développement de l'élevage en générale et de l'élevage bovin en particulier s'articule autour de l'impératif d'assurer durablement la sécurité alimentaire et de garantir la croissance du secteur à un rythme favorisant le développement d'ensemble. Le secteur bovin joue un rôle stratégique à l'égard de son impact sur la sécurité alimentaire et de sa place sur le plan socio-économique. La stratégie nationale mise en œuvre pour organiser le secteur bovin en Tunisie et pour augmenter la production de viande bovine et de lait se justifie par le caractère stratégique acquis par ces produits parmi les priorités nationales et pour lesquels l'autosuffisance est devenue impérative. L'accroissement prévu de la demande et le souci de préserver à la fois le pouvoir d'achat des consommateurs et le revenu des éleveurs à moyen et à long terme appellent les responsables à envisager des mesures d'intervention afin d'assurer l'adéquation entre les besoins futurs des consommateurs et l'évolution potentielle des possibilités réelles de production. A

Abstract

This work aims at developing and testing a model on the dynamics of the bovine population in Tunisia. Through this model that specifies the biological relationships between the categories making the herd structure over time, estimates on the culling and slaughter rates by category and their variation over the period 1990-2000 were obtained. Estimated values of the structural parameters of the model for the same period will be used to simulate the evolution of the annual herd and the meat production for different categories. The assessed results will be compared with observed data. For the local race, the culling rate proved to vary from year to year with an average of nearly 14.7 % and a high percentage of calves (including females) were slaughtered during their first year. For the dairy race the culling rate was close to 20 % but less stable over time. There was no slaughtering of young females. The application of this model pointed out an important proportion of the uncontrolled slaughter. This modeling work is particularly useful to decision-makers in order not to neglect the real behaviour of farmers with respect to the size and composition of their herds.

Keywords: Model, cattle, breeding females, culling rate, slaughter rate, production, meat.

Résumé

Ce travail vise à développer et à tester un modèle sur la dynamique de la population bovine en Tunisie. A partir de ce modèle, qui décrit notamment les relations biologiques structurelles liant les différentes catégories qui composent ce cheptel dans le temps, une estimation des paramètres de réforme et d'abattage qui le caractérisent a été réalisée sur la période 1990-2000. Ensuite, nous avons utilisé les valeurs estimées des paramètres structurels du modèle en considérant la même période afin de simuler l'évolution des effectifs annuels des différentes catégories ainsi que la production de viande. Les effectifs et le volume de production ainsi estimés seront comparés aux données observées. Nous avons constaté que, pour la race locale, les éleveurs pratiquent un taux de réforme fluctuant d'une année à l'autre. Ils cèdent un fort pourcentage de leurs jeunes bovins à l'abattage précoce. Pour la race pure, le taux de réforme est presque conforme à la « norme » avec une moyenne de 20 %. Les jeunes femelles sont conservées pour accroître davantage la taille du troupeau. L'application du modèle a mis en exergue l'importante proportion de l'abattage incontrôlé. Le travail de modélisation servira en tant qu'outil d'aide à la décision permettant aux décideurs de prendre en considération le comportement des éleveurs dans le développement d'une stratégie appropriée pour le secteur d'élevage bovin en Tunisie.

Mots-clés: Modèle, bovins, femelles de reproduction, taux de réforme, taux d'abattage, production, viande

cet effet, les décideurs doivent disposer d'un cadre d'analyse permettant d'identifier les facteurs qui président à l'évolution des cheptels et au comportement des éleveurs en vue de quantifier et de prévoir l'effet des mesures ciblées relatives à la production de viande.

La production totale des viandes bovines est le produit des effectifs d'abattage par le poids de carcasse relatif à chaque catégorie d'animal et à chaque race. Ces deux composantes peuvent varier d'une année à l'autre sous l'effet de plusieurs types de facteurs, les uns sont d'ordre biologique (paramètres de fertilité, de mortalité, de réforme), les autres sont relatifs à la conduite du troupeau (alimentation, soins et hygiène, âge d'abattage) et au comportement des éleveurs vis-à-vis de leur environnement économique et naturel (prix, pluviométrie, milieu). L'ensemble des paramètres (biologiques) et des facteurs environnants agissent à la fois sur la variation des effectifs et sur la productivité (poids de carcasse)

et ce, de manière différente dans le temps et dans l'espace et pour chaque race.

L'objet de ce travail est de contribuer à combler une lacune dans la modélisation et le diagnostic de la dynamique de la population bovine à travers l'élaboration d'un modèle. Dans sa première partie, le modèle cherche à estimer à

* IRA de Médenine –Tunisie.

** INAT-Tunisie.

posteriori l'évolution des effectifs à travers la variation des paramètres caractérisant la structure du troupeau. Pour évaluer la variation de ces paramètres, on utilise généralement les données statistiques relatives à la composition des troupeaux (effectifs des cheptels par catégorie).

Le développement d'un modèle met à contribution deux types d'investigations. Le premier est relatif à l'identification des mécanismes de fonctionnement du cheptel que peuvent refléter les lois biologiques et démographiques gouvernant les différentes catégories des bovins. Le second concerne l'identification des paramètres qu'on qualifie de décisionnels dans la mesure où ils reflètent le comportement des éleveurs, notamment en matière de réforme et d'abattage. Le modèle peut être vu tout d'abord comme une méthode de diagnostic économique, mais aussi comme une méthode de modélisation d'une filière pour le compte d'une petite nation. Il sera d'abord formalisé, puis mis en œuvre dans un cas concret et, enfin, discuté à la lumière des résultats obtenus.

1. Analyse de la littérature

L'effervescence autour de la modélisation de la dynamique des systèmes complexes a ouvert des perspectives grandissantes à de nouvelles approches pour la modélisation de la dynamique des systèmes biologiques. Les écologistes ont été les premiers à essayer de suivre la dynamique des populations humaines et animales sauvages (William, 1996; Caswell, 1989a et 1989b).

La modélisation de la dynamique des systèmes biologiques est restée longtemps cantonnée dans une approche analytique ou probabiliste où les mathématiciens trouvaient une application des calculs différentiels et matriciels.

Les premiers efforts de modélisation en dynamique des populations se sont concentrés sur des modèles de croissance exponentielle, découlant des formules de Bertalanffy, de Compertz (Ben Hammouda, 1985) et de Makeham (Caswell, 2001). Avec ces lois apparaissait le souci d'une justification d'essence biologique, beaucoup d'autres modèles recourent à une formulation mathématique où l'on manipule une variable agrégée caractéristique de la population considérée dans son ensemble. Ces modèles, que nous appelons modèles agrégés de dynamique des populations, s'appuient sur une ou plusieurs équations différentielles. Les modèles de population ont leurs ancêtres modernes dans le modèle logistique surtout dans les travaux d'A Lotka, au début du vingtième siècle, sur les populations stables (Caswell, 2001), connus sous le nom de «stable age theory». Cette théorie relie la structure à la dynamique de la population classée par catégorie d'âge et vivant dans un environnement stable.

La prise en compte des différentes classes d'âge au sein d'une même population conduit à un modèle matriciel comme celui de Leslie (Leslie, 1945; 1948a, 1948b). Il a mis au point une représentation matricielle appropriée pour incorporer dans le modèle les contraintes naturelles. Les matrices de Leslie sont des modèles démographiques dérivés de

l'analyse des chaînes de Markov, développés essentiellement pour examiner des structures de population. Il s'agit en effet de prendre en compte le fait que la natalité et la mortalité d'une population varient en fonction de l'âge des individus, de sorte que l'entité élémentaire manipulée ici n'est pas la population dans son ensemble mais la classe d'âge. Les modèles matriciels offrent un cadre très général d'étude de la dynamique des populations structurées (Caswell, 1989b). Cette approche «naturelle», qui s'appuie sur le cycle de vie d'une espèce donnée, suppose une vision « discrète » des phénomènes qui correspond souvent à la nature des données de terrain dont dispose le biologiste. Le modèle peut s'écrire sous la forme:

$$M(t+1) = T_M * M(t)$$

Où, $M(t)$ est un vecteur de dimension (n) dont chacune des composantes représente le nombre d'individus d'un âge ou d'un stade donné à la date (t) et T_M est une matrice carrée dite de «transition» qui intègre les paramètres démographiques de la population. Les caractéristiques de cette matrice (valeurs et vecteurs propres) s'interprètent en termes de taux de croissance et de distribution stationnaire des âges ou des stades.

Plus tard, Joandet et Cartwright (1975) ont décrit le système de production bovine par un modèle mathématique qui a servi à l'évaluation et à l'examen de certaines alternatives de production. En d'autres termes, la maximisation technique d'un objectif peut être employée pour simuler l'effectif optimal du bétail ou le système de gestion d'un panier spécifique de production.

Sur un autre plan, plusieurs modèles informatisés ont été appliqués à l'analyse de la dynamique de la population bovine dans différents pays. Ces modèles ont tous des objectifs particuliers et portent sur des élevages dont les caractéristiques sont spécifiques au pays ou à la situation étudiée. En fait, le modèle le plus ancien en la matière est le modèle « TAMU » qui a été élaboré par Sanders et James entre les années 1974-1977, et par Sanders et Cartwright, 1979a, b. Il permet d'effectuer des simulations sur l'évolution de la taille et de la structure de composition du troupeau afin d'optimiser l'utilisation des ressources alimentaires disponibles.

Ce modèle a donné lieu à plusieurs applications en vue d'estimer la production de viande dans certains pays, notamment en Amérique Latine. Il a été appliqué en Guyane en 1976, en Colombie en 1977, au Venezuela en 1978, au Botswana en 1981 et en Tanzanie en 1979 (Cartwright, 1977). À cet égard, nous pouvons aussi citer les travaux de Upton (1989 et 1993), (Levine *et al.*, 1981), (Brokington *et al.*, 1981 et 1992) qui, utilisant «les traits» de productivité tels que les taux de reproduction et de mortalité, a déterminé le stock de femelles nécessaire pour satisfaire un niveau de production déterminé.

Le cheptel bovin constitue à la fois un capital d'investissement (variation des effectifs) et une source de revenu (produits de consommation). En particulier, les unités fe-

melles sont responsables de la production de viande bovine et de lait. Cependant, les valeurs des animaux élevés se déprécient et leur productivité diminue en fonction du temps. Il faut donc les remplacer au fur et à mesure, pour maintenir le troupeau à un niveau de productivité acceptable. À l'échelle de l'exploitation, la taille du troupeau varie chaque année, sur la base des décisions de l'éleveur (Roche *et al.*, 2001), visant à établir, voire maintenir, un certain équilibre entre ses besoins immédiats (vente) et futurs (investissements). Les décisions relatives à un tel équilibre sont déterminées d'une part par les paramètres propres à l'élevage en question (fertilité, mortalité et productivité) et, d'autre part, par les facteurs liés à la conjoncture économique et aux conditions climatiques. Elles varient nécessairement dans l'espace (d'un éleveur à l'autre et d'une région à l'autre) et dans le temps (d'une année à l'autre). Il s'ensuit qu'à l'échelle nationale, la variation des effectifs est le résultat de l'interaction de plusieurs facteurs qui sont liés à la fois aux caractéristiques biologiques, aux conditions du milieu, à la conjoncture économique et au comportement des éleveurs. En outre, l'ensemble de ces facteurs n'affecte pas de la même manière les différentes races ni les différentes catégories (âge et/ou sexe). Ainsi, outre la variation de la taille, même la structure du troupeau peut changer (Hui-Ping, 1998), par exemple, suite à la substitution de la race pure par la race locale, ou à la modification du taux de réforme ou de remplacement ou, encore, à la prolongation de la période d'engraissement des jeunes.

Avec l'essor de la micro-informatique, le principe de simuler sur ordinateur des systèmes complexes, comme les systèmes d'élevage, est apparu aux chercheurs comme un formidable moyen à la fois pour mieux comprendre ces systèmes et pour en prédire le comportement. Ceci a justifié notamment un effort de recherche important, depuis plusieurs décennies, pour contribuer à la construction de modèles de simulation du cheptel ou de sa production. Un certain nombre des applications informatisées a été développé, permettant la simulation de la dynamique de la population, des flux et stocks de production ainsi que de l'énergie requise. Dans les travaux de Baptist (1991), on trouve le modèle «PRY» et le modèle «Production Efficiency Calculator (LPEC)» qui constitue en fait une base de données intégrées, liée à un algorithme qui automatise la saisie, le calcul et la visualisation des données et des résultats simulés. Ces programmes traitent la gestion des cheptels bovin, ovin ou caprin au Kenya en utilisant des variables biologiques telles que le sexe, l'âge, la fertilité, etc.

Toutefois, il faut noter que ces modèles ne peuvent pas être un « prêt-à-porter » applicable dans tous les pays. Ils sont, en toute rigueur, non universels et donc à construire et à valider pour chaque pays qui désire l'appliquer. Par ailleurs, lorsque la variable à laquelle on s'intéresse est le cheptel ou le rendement d'un cheptel, il ne faut pas confondre le secteur de production de viande australien, américain ou européen, qui constitue une industrie en soi, à un secteur aussi petit comme celui, par exemple, de la Tunisie, d'au-

tant plus que les comportements des acteurs ne sont jamais similaires.

2. Conception théorique du modèle

Les modèles dynamiques de façon générale étudient la variation dans le temps d'une ou de plusieurs variables d'intérêt, qui sont dans le cas présent la taille du troupeau bovin national et ses différentes composantes (par race et par catégorie d'âge). Naturellement, les modèles cités ci-dessus ne s'accroissent pas facilement avec les objectifs de cette étude, car ils ne sont pas adaptés à la situation de l'élevage tunisien et, encore moins, aux types de données qui sont disponibles. Il est donc nécessaire de développer un modèle spécifique qui s'accroisse mieux avec le contexte et les moyens disponibles pour la réalisation des objectifs de ce travail. A cet effet, nous avons opté pour la formulation d'un modèle mathématique basé sur les lois biologiques qui caractérisent la vie naturelle de la population en question et qui président à sa dynamique d'évolution dans le temps et aux relations d'équilibre entre ses différentes composantes. Cette formulation repose essentiellement sur des équations différentielles élaborées pour représenter les variations temporelles et relier les variables entre elles. Le système d'équations ainsi obtenu sera ensuite confronté aux données observées pour estimer les paramètres et tester la pertinence du modèle.

2.1. Spécification du modèle

Le modèle est basé sur une représentation discrète et simplifiée du cycle de vie de l'espèce: il faut donc choisir une lapse de temps et une date de recensement. Le choix d'une lapse de temps annuel s'impose compte tenu du mode de reproduction annuel de l'espèce. La date de recensement est plus délicate à choisir car les inventaires se font à différentes périodes de l'année selon les enquêtes agricoles. Ce choix nous obligera, par exemple, à donner un âge d'un an aux naissances survenues au cours de l'année.

La désignation des catégories est basée sur la race, le genre et l'âge:

- La race

Le modèle général est construit pour l'ensemble des races en présence mais son application se fera selon trois variantes:

- pour l'ensemble des races (variable sans indice)
- pour les races locales et croisées (variable avec indice «L»)
- pour les races pures laitières (variable avec indice «P»).
- Le genre et l'âge

Dans sa carrière, un animal, d'après son âge, va appartenir à différentes catégories. En tenant compte des besoins de l'analyse, sept catégories de bovins sont retenues dans le modèle, bien que dans la pratique des regroupements seront effectués en l'absence de données disponibles différenciées:

- Les femelles reproductrices (vaches et génisses pleines); $g_0 = g_{0L} + g_{0P}$
- Les vaches d'âge inférieur à 1 an: g_1

- Les génisses d'âge entre 1 et 2 ans: g_2
- Les génisses d'âge entre 2 et 3 ans: g_3
- Les mâles (taureaux et taurillons) d'âge supérieur à 2 ans; $h_0 = h_{0L} + h_{0P}$
- Les taurillons d'âge entre 1 et 2 ans: h_2
- Les veaux d'âge inférieur à 1 an: h_1

L'évolution dynamique du cheptel bovin dépend de nombreux paramètres, dont essentiellement:

- le taux de naissance: bien que l'objectif pour l'éleveur soit d'obtenir un veau et une lactation pour chaque vache chaque année, le meilleur taux de naissance enregistré en Tunisie est de 85 %. D'après les documents de suivi du secteur, l'intervalle entre deux vêlages serait d'environ 17 mois (taux de naissance est égal à 65 % pour la race locale). Il est à noter à cet égard qu'un travail de recherche très récent (Selmi, 2002) stipule que l'intervalle de vêlage peut être raccourci par des traitements vétérinaires appropriés;

- l'âge d'entrée en production: une génisse devient une vache après la première mise bas (âge au premier vêlage), c'est-à-dire vers deux ans et demi ou trois ans plus neuf mois;

- le taux de réforme: la réforme concerne pour l'essentiel les animaux devenus inaptes au travail ou à la production laitière. Ce taux est considéré généralement aux alentours de 20 %, exception faite pour les animaux importés pour lesquels le taux pratiqué au début des années soixante-dix était de 10 % selon le plan quadriennal 1973-1976 (Ministère de l'Agriculture);

- le taux de mortalité: la mortalité dans le cheptel est estimée à partir de la base de données du suivi d'un échantillon représentatif du cheptel. Il semble que les taux de mortalité (hors abattage) sont similaires (environ 2 %) chez les animaux adultes, quelle que soit la catégorie, et plus élevés chez les veaux (de 6 % à 8 % selon la race).

Chez les bovins, les principales améliorations portent essentiellement sur ces paramètres. À partir de ces possibilités théoriques de l'espèce, l'évolution des effectifs dépendra ensuite surtout du nombre de jeunes femelles qui seront conservées par les éleveurs pour la reproduction. Compte tenu des besoins en viande du pays, et pour favoriser au maximum l'accroissement des effectifs, le renouvellement et l'extension du troupeau doivent être assurés, essentiellement, par les produits nés et élevés sur place (en Tunisie). Les éleveurs gardent leurs veaux ou les vendent au bout d'un moment, pour ceux qui en ont en surplus, à d'autres éleveurs qui les achètent et les élèvent pour les engraisser ou les préparer à une carrière de géniteur (génitrice). Il est donc nécessaire de prévenir les abattages prématurés et de veiller à ce que toutes les génisses soient mises en élevage, ce qui n'a pas été toujours le cas. En effet, pendant l'élaboration du plan de développement, les sous comités de l'élevage bovin retiennent comme hypothèse qu'entre 75 % et 88 % des génisses nées en Tunisie sont conservées pour la reproduction (VI^{ème} plan). Cette hypothèse nous paraît op-

timiste dans la mesure où elle suppose des soins d'élevage attentifs et des disponibilités alimentaires qui progressent au même rythme que les besoins d'un troupeau en pleine expansion. En Tunisie, les sources potentielles d'abattage des bovins sont constituées par les taurillons, les vaches réformées et les génisses jugées non utiles issues du cheptel en présence. La production totale de viande bovine est le produit des effectifs d'abattage par le poids de carcasse moyen relatif à chaque catégorie d'animaux et à chaque race. Ces deux composantes varient aussi d'une année à l'autre sous l'effet de plusieurs types de facteurs, certains d'ordre biologique (paramètres de fertilité, de mortalité, de réforme) d'autres relatifs à la conduite du troupeau (alimentation, soins et hygiène, âge d'abattage) et au comportement des éleveurs vis à vis de leur environnement économique et naturel (prix, pluviométrie, milieu). L'ensemble des paramètres biologiques et des facteurs environnants agit à la fois sur la variation des effectifs et sur la productivité (poids de carcasse) dans le temps et dans l'espace et ce, d'une manière différente pour chaque race et pour chaque catégorie d'une même race.

2.2. Formulation mathématique du modèle

Le modèle comprend deux parties:

La première partie est une équation d'identité qui établit l'effectif global par la somme des catégories qui le composent. On peut ainsi écrire, pour l'ensemble des effectifs en présence à l'année t :

$$K(t) = g_0(t) + g_1(t) + g_2(t) + h_0(t) + h_1(t) + h_2(t) \quad (3.0)$$

la deuxième partie est un système de 6 équations explicites pour chaque catégorie, la genèse de ses effectifs.

Dans ce qui suit, nous allons passer en revue les lois biologiques qui gouvernent les différentes catégories bovines et qui sont, en fait, les équations de base du modèle dans sa première formulation.

L'initialisation du modèle dynamique est le nombre de femelles reproductives en présence au cours de l'année (t), noté et susceptible d'assurer la reproduction. Au cours de l'année (t), le nombre d'unités femelles capables de se reproduire est donné par l'équation suivante:

$$g_0(t) = \alpha_0 g_0(t-1) + \alpha_3 g_2(t-1) \quad (3.1)$$

Où,

$\alpha_0 = (1 - m_0)(1 - r)$: est le taux de survie des vaches présentes en l'année ($t-1$), ou encore la proportion des vaches qui n'ont subi ni mortalité (m) ni réforme (r), ni autre liquidation par abattage.

r : taux de réforme des vaches.

$\alpha_3 = (1 - m_3)(1 - l_3)$: est le taux de survie des génisses de plus de 2 ans (âge de 1 à 2 ans en l'année ($t-1$), nées l'année ($t-2$)) pour intégrer la catégorie des femelles reproduc-

trices et encore en vie durant l'année (t).

l_2 : taux d'abattage des génisses entre 2 et 3 ans d'âge.

m_0 : taux de mortalité des bovins adultes.

m_2 : taux de mortalité des animaux entre 2 et 3 ans d'âge.

L'effectif des vaches $g_0(t)$ comprend deux composantes qui sont, d'une part, une proportion des vaches reconduites de l'année précédente $g_0(t-1)$, après déduction des vaches disparues ou réformées et, d'autre part, une partie des génisses nées depuis trois ans $g_2(t-1)$ et qui ont survécu aux mortalités annuelles et au prélèvement pour abattage précoce.

Ces unités femelles donnent naissance au cours de la même année à un effectif de jeunes qui dépend du taux de fécondité ou de naissances moyen. Ainsi, si l'on suppose que le nombre des naissances survenues au cours de l'année (t) est reparti selon une loi naturelle, à raison de 50 % de velles et 50 % de veaux, le nombre des naissances des femelles (velles) viables sera déterminé par l'équation suivante:

$$g_1(t) = \alpha_1(\eta/2) g_0(t) \quad (3.2)$$

Avec,

$\alpha_1 = (1 - m_1)(1 - l_1) = 1 - (m_1 + q_0)$: le taux de survie des génisses durant leur première année (année de naissance).

l_1 : taux d'abattage des velles par rapport aux naissances viables.

$q_0 = [(1 - m_1)l_1]$: taux d'abattage des velles par rapport aux naissances brutes.

η : taux de naissances totales, dont la répartition naturelle est à raison de 50% de velles et 50 % de veaux.

m_1 : taux de mortalité des jeunes bovins d'âge inférieure à 1 an.

En effet, les velles nées l'année précédente ($t-1$) et ayant survécu à la mortalité et à l'abattage durant la première année de leur naissance pour donner, ainsi qu'à la mortalité de la deuxième année (t), constitue les génisses d'âge compris entre un et deux ans, notées, sont représentées ainsi:

$$g_2(t) = \alpha_2 g_1(t-1) \quad (3.3)$$

Où,

$\alpha_2 = (1 - m_2)(1 - l_2)$: est le taux de survie des génisses durant leur deuxième année de vie (âge de moins de 1 en l'année ($t-1$), nées en ($t-1$)).

l_2 : est le taux d'abattage des génisses d'âge entre 1 et 2 ans.

Par similitude avec les catégories femelles, les catégories des mâles sont soumises à des lois similaires. Comme pour les velles de la même génération, le nombre de veaux net de mortalité et d'abattage présent en l'année (t) est explicité dans l'équation suivante:

$$h_1(t) = \beta_1(\eta/2) g_0(t) \quad (3.4)$$

Où,

$\beta_1 = 1 - (m_1 + q_1)$: est le taux de survie des veaux durant leur première année (année de naissance).

q_1 : taux d'abattage des veaux d'âge inférieur à 1 an.

Les taurillons âgés de deux ans présents l'année (t) sont les veaux nés l'année précédente et qui n'ont subi ni mortalité ni abattage au cours de leur première année (année de naissance ($t-1$)):

$$h_2(t) = \beta_2 h_1(t-1) \quad (3.5)$$

Où,

$\beta_2 = 1 - (m_2 + q_2)$: est le taux de survie des taurillons durant leur deuxième année (âge de moins de 1 an l'année ($t-1$), nés l'année ($t-1$)).

L'effectif des mâles adultes l'année (t), notés (h_0), comprend deux composantes: d'une part, une proportion des taureaux reproductifs reconduits de l'année précédente, après déduction de ceux disparus ou réformés, et d'autre part, une partie des taurillons nés depuis trois ans et qui ont survécu aux mortalités annuelles et au prélèvement pour abattage:

$$h_0(t) = \beta_0 h_0(t-1) + \beta_3 h_2(t-1) \quad (3.6)$$

Où,

$\beta_0 = 1 - (m_0 + s)$: est le taux de survie des mâles (âge supérieur à 2 ans l'année ($t-1$)) ou encore la proportion des mâles qui n'ont subi ni mortalité (m), ni réforme (r), ni autre liquidation par abattage.

s : est le taux de réforme des taureaux adultes.

Enfin, ces lois biologiques qui gouvernent l'évolution du cheptel constituent ensemble une première formulation du modèle qui décrit, sous forme fonctionnelle, les caractéristiques structurelles et dynamiques des cheptels en présence. Il s'agit particulièrement de facteurs biologiques et comportementaux qui gouvernent l'évolution des effectifs destinés à la boucherie ou à la reproduction.

Les équations de base des effectifs des femelles:

$$g_0(t) = \alpha_0 g_0(t-1) + \alpha_3 g_2(t-1) \quad (3.1)$$

$$g_1(t) = \alpha_1(\eta/2) g_0(t) \quad (3.2)$$

$$g_2(t) = \alpha_2 g_1(t-1) \quad (3.3)$$

Les équations de base des effectifs des mâles:

$$h_1(t) = \beta_1(\eta/2) g_0(t) \quad (3.4)$$

$$h_2(t) = \beta_2 h_1(t-1) \quad (3.5)$$

$$h_0(t) = \beta_0 h_0(t-1) + \beta_3 h_2(t-1) \quad (3.6)$$

Où les indices se réfèrent à l'âge:

0: indice des adultes;

1: indice des génisses de moins d'un an;

2: indice des génisses de 1 à 2 ans;

Soit en notation matricielle

$$\begin{pmatrix} g_0(t) \\ g_1(t) \\ g_2(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_0 & 0 & \alpha_3 \\ \alpha_0 \alpha_1 (\eta/2) & 0 & \alpha_0 \alpha_3 (\eta/2) \\ 0 & \alpha_2 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} g_0(t-1) \\ g_1(t-1) \\ g_2(t-1) \end{pmatrix}$$

$$G(t) = T_g \cdot G(t-1)$$

Avec $G(t)$, qui est la matrice des effectifs femelles, et (T_g) , qui est la matrice de transfert de $(t-1)$ à (t) .

$$\begin{pmatrix} h_0(t) \\ h_1(t) \\ h_2(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \beta_0 & 0 & 0 & \beta_3 \\ 0 & \beta_1 (\eta/2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \beta_2 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_0(t-1) \\ g_0(t) \\ h_1(t-1) \\ h_2(t-1) \end{pmatrix}$$

$$H(t) = T_h \cdot H^*(t-1)$$

Avec $H(t)$, la matrice des effectifs mâles, et T_h , matrice de transfert de $(t-1)$ à (t) .

Remarque: Les effectifs sont calculés à la fin de la période $(t-1, t)$. Comme les divers taux sont annuels, cette période est donc d'une année. Toutefois, (t) peut désigner n'importe quelle date au sein de la même année.

Avec;

α_i et β_j : taux de survie des bétails présents en l'année $(t-1)$, ou encore la proportion des bovins qui n'ont subi ni mortalité (m) , ni réforme (r) , ni autre liquidation par abattage.

r : taux de réforme des vaches.

l_i : taux d'abattage des unités femelles d'âge inférieur à i .

m : taux de mortalité des bovins.

q_j : taux d'abattage des veaux d'âge inférieur à j an.

s : est le taux de réforme des taureaux adultes.

3. Applicabilité du modèle

L'intérêt principal de ce modèle réside dans le rôle joué par les paramètres structurels, aussi bien à caractère biologique que comportemental. Ces paramètres clés, tels que le taux de réforme, le taux de renouvellement et le taux d'abattage qui sont incorporés dans les coefficients (α_i) et (β_j) , déterminent à la fois l'évolution dynamique des effectifs et la composition du troupeau. Plusieurs facteurs agissent en interaction permanente, sur la dynamique d'évolution des cheptels bovins, déterminant à la fois les effectifs annuels et l'évolution de la structure des troupeaux. Certains de ces facteurs sont liés à des paramètres biologiques des cheptels en présence, d'autres à l'environnement, notamment au comportement des éleveurs vis-à-vis des conditions climatiques et économiques. D'ailleurs, notre hypothèse principale dans ce travail de modélisation est que les éleveurs agissent et modulent ces paramètres clés vis-à-vis des conditions climatiques et économiques. Autrement dit, la variabilité de ces paramètres est provoquée par le comportement des éleveurs dans la gestion de leurs effectifs.

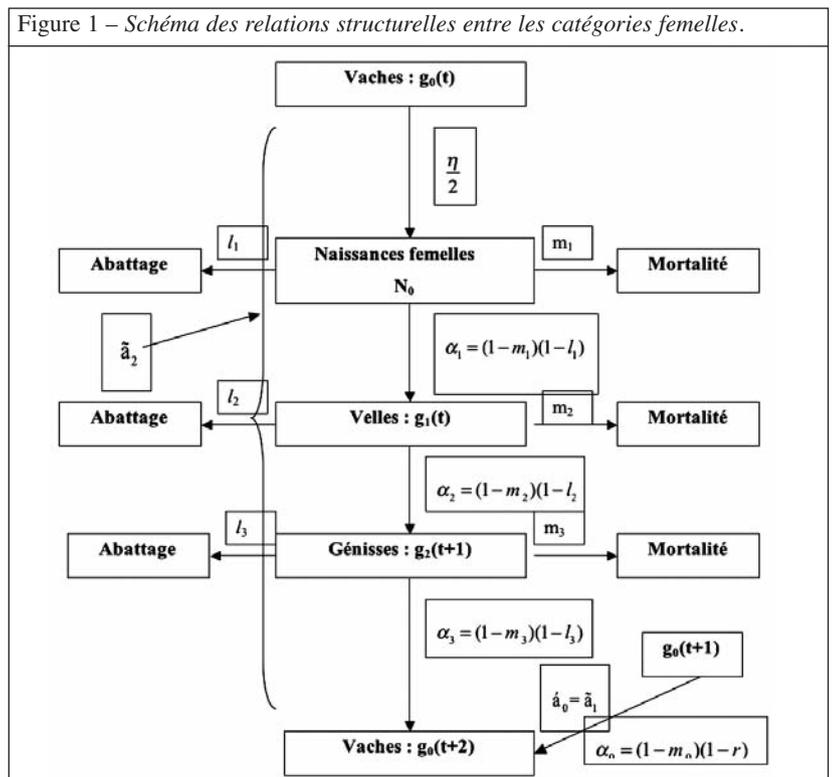
La contrainte principale du modèle réside dans la disponibilité et dans la qualité des données statistiques nationales existantes. Bien que les données sur les effectifs bovins soient disponibles dans les statistiques nationales de façon continue depuis 1961, à l'exception de quelques années (1992 et 1997), elles sont relatives aux effectifs globaux (K) et aux femelles adultes (g_0) . Mais la répartition entre les catégories d'âge et entre les races n'est pas toujours spécifiée de manière cohérente pour la période, surtout avant 1990. Seulement l'enquête sur les exploitations agricoles (1995) contient la liste complète des catégories concernées par cette analyse qui permet une estimation ponctuelle de certains ratios.

4. Reconstitution du troupeau et estimation de la production de viande

L'usage prévisionnel ou encore la validité du modèle dépend de son pouvoir à reconstituer les effectifs utilisés au départ. Aussi, on peut se demander à quel point et avec quel degré de fiabilité le modèle peut reconstituer les effectifs de départ et en particulier la composition du troupeau par catégorie. Si le modèle s'avère fiable nous allons pouvoir estimer la production de viande totale et par catégorie qui elle aussi sera comparée aux données statistiques observées.

Ainsi, sur la base des statistiques disponibles pour la décennie 1990-2000, de prime abord, nous avons estimé les paramètres clés du modèle, notamment les taux de réforme et d'abattage des différentes catégories. Ensuite, disposant des valeurs estimées des paramètres structurels du modèle pour la période 1990-2000, nous l'avons utilisé pour simuler l'évolution des effectifs annuels des différentes catégories. Les effectifs ainsi estimés seront comparés aux données observées pour tester la performance du modèle.

Figure 1 – Schéma des relations structurelles entre les catégories femelles.



La comparaison avec les données observées permet de relever ce qui suit:

Le modèle reproduit fidèlement la tendance à un accroissement progressif de l'effectif de la race pure aux dépens de la race locale. Les vaches de race pure sont passées de 28,53 % du nombre total des vaches en présence en 1990 à 42,24 % en 2000.

Pour la race pure, les effectifs estimés coïncident presque parfaitement avec les effectifs observés, année par année.

Pour la race locale la correspondance n'est pas aussi parfaite: l'écart fluctue de +17000 en 1990 et 1991 à -7000 têtes en 1996. La source d'erreur est probablement imputable à l'estimation du taux d'abattage des vaches de la race locale due au manque de précision des données statistiques relatives à cette catégorie (tableau 1).

Tableau 1 – Simulation des effectifs des unités femelles par race (nombre de têtes).

Années	g_{OL} observé	\hat{g}_{OL} estimé	Écart $g_{OL} - \hat{g}_{OL}$	g_{OP} observé	\hat{g}_{OP} estimé	Écart $g_{OP} - \hat{g}_{OP}$
1990	248800	266278	+17478	99300	99299	0,001
1991	256570	274116	+17546	100750	100754	-0,004
1992	259000	257875	-1125	105000	104998	+0,002
1993	258690	257170	-1519	122740	122745	-0,005
1994	262480	261064	-1416	123620	123620	0
1995	257500	262776	+5276	127100	127,101	-0,001
1996	264660	256767	-7892	144650	144650	0
1997	272380	268884	-3495	158000	158001	-0,001
1998	287240	286274	-965	171290	171297	-0,007
1999	285720	286843	+11233	194100	194097	+0,003
2000	278470	276152	-2317	203660	203666	-0,006

L'écart quadratique moyen EQM est défini par la formule suivante (Combette, 1994):

$$EQM(\%) = 100 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (G_0 - \hat{G}_0)^2}{n \bar{G}_0}}$$

Il permet d'apprécier la qualité d'ajustement du modèle aux données observées.

5. Estimation de la production de la viande

La production totale de viande est obtenue par la somme des produits des effectifs abattus par les poids de carcasses moyens correspondants. Ces poids de carcasse sont puisés dans les sources documentaires disponibles, en particulier dans les études relatives au secteur telles que le «Plan Directeur des Abattoirs» et «L'engraissement des taurillons» réalisées par le GIVR. En utilisant les données disponibles pour la période 1990-2000, une estimation de la production de viande a été faite. Les résultats sont présentés dans la figure 4.

En particulier, cette estimation permet de relever un certain nombre de remarques importantes sur l'évolution quantitative et qualitative des viandes bovines produites au cours de la décennie 1990-2000:

Figure 2 – Simulation de série du cheptel de vaches de race locale (EQM : 3,05%).

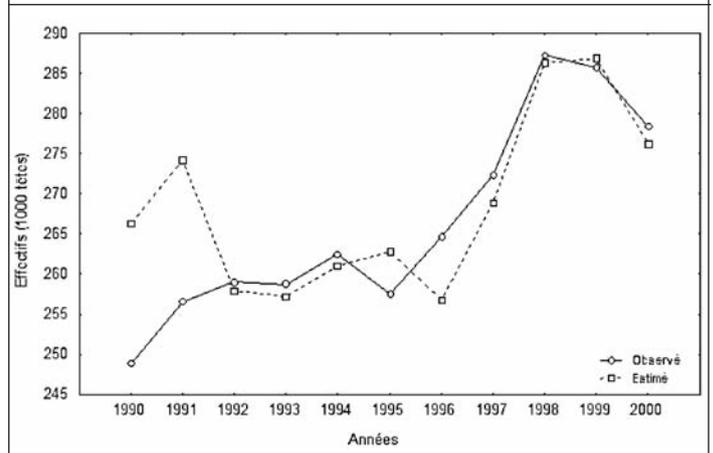
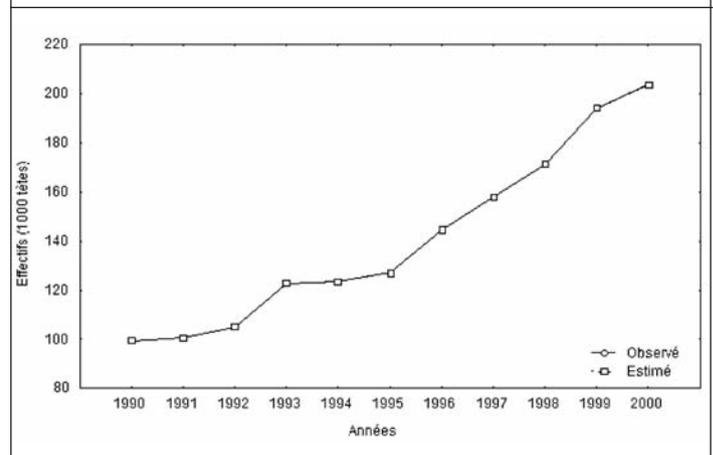
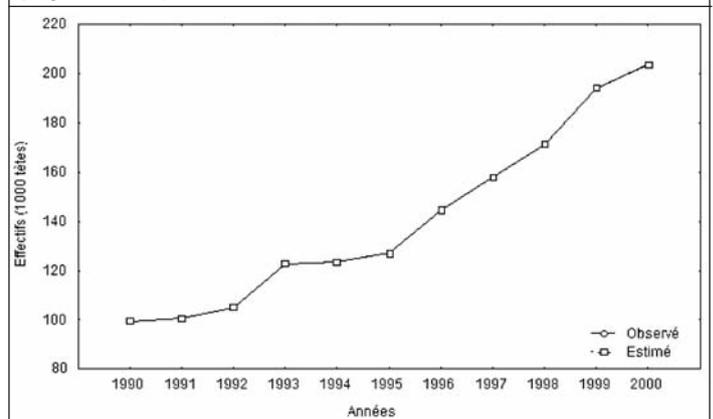


Figure 3 – Simulation de série du cheptel de race pure (EQM : 0,02%).



- Le volume total de viande produite entre 1990 et 2000 est passé de 38 220 tonnes à 52 002 tonnes, soit une augmentation de 3,28 % en moyenne par an, alors que les effectifs d'abattage ont connu une augmentation de 3,75 % par an en moyenne, passant de 188 892 têtes à 268 139 têtes. Cependant, l'augmentation de la production n'a pas été régulière et

Figure 4 – Simulation de série de la production nette de viande totale (EQM : 7,19%).



présente parfois des écarts importants par rapport aux chiffres donnés par les statistiques nationales, en particulier pour les années 1990 (+ 4 420 tonnes) et 1996 (- 6 394 tonnes).

- L'écart important de la production de viande estimée par rapport aux chiffres donnés par les statistiques nationales nous paraît très logique dans la mesure où ces chiffres concernent seulement l'abattage contrôlé. Pour dire, cet écart ne constitue en aucune manière une défaillance du modèle mais surtout il met en exergue l'importance de la proportion de l'abattage incontrôlé en Tunisie.

Conclusion

Malgré l'insuffisance quantitative et qualitative des données disponibles, il a été montré qu'il est possible de parvenir à formuler la composition du troupeau et son évolution dans le temps pour évaluer, à chaque moment, les effectifs en présence et la production de viande par catégorie. Les paramètres estimés, relatifs aux taux de réforme et d'abattage des différentes catégories, ont été utilisés dans le modèle pour retracer l'évolution dynamique des effectifs et les productions annuelles de viande durant la période étudiée 1990-2000. Les écarts entre les statistiques observées et les estimations du modèle nous semblent tolérables, étant donné la qualité des données disponibles. Ceci constitue en soi un test positif de performance du modèle que nous pouvons alors utiliser pour faire des projections prévisionnelles.

Bibliographie

Baptist, R., 1991. Population dynamics and productivity at the stationary state of culling regime in livestock herds and flocks. University of Nairobi, department of animal production, Nairobi, Kenya, 1991.

Ben Hammouda M. 1985. Description biométrique et amélioration génétique de la croissance pondérale des ovins de race barbarine en Tunisie. Thèse de doctorat, Faculté des sciences agronomiques, GAND Belgique.

Benoit M., 1998. Un outil de simulation du fonctionnement du troupeau ovin allaitant et de ses résultats économiques: une aide pour l'adaptation à des contextes nouveaux. INRA, Production Animales, 11 (3), 199-209.

Cartwright T. C., 1977a. Size as a component of beef production efficiency: Cow-calf production. Beef cattle session of the 69th annual meeting of the American Society of Animal Science. University of Winsconsin, July 1977.

Cartwright T. C., 1977b. The TAMU beef cattle production model. Animal Science department, Texas A&M University.

Caswell, H. 1989a. The analysis of life table response experiments. Decomposition of effects on population growth rate. Ecological modelling 46, pp: 221-237.

Caswell, H. 1989b. Life history strategies. Pp: 285-308, in J.M. Cherret, editor. Ecological concepts Oxford England.

Caswell, H. 2001. Matrix population models. Sinauer, Sunderland, Massachusetts, USA, 328p.

Chavas, J.-P., J. Kliebenstein, and T.D. Crenshaw. 1985. Modelling Dynamic Agricultural Production Response: The Case of Swine Production. American Journal of Agricultural Economics 67:636-46.

Chilonda P., & G. Van Huylenbroeck, 2001. A conceptual framework for the economic analysis of factors influencing

decision-making of small-scale farmers in animal health management. Rev. sci. tech. Off. int. Epiz., 2001, 20 (3), pp, 687-700.

Coquillard, P. et Hall, 1997. Modélisation et simulation d'écosystèmes. Masson: Paris, 273 pp.

FAO., 1988. Programme de développement des productions fourragères et de l'élevage: Orientation pour un programme régionalisé de développement des ressources fourragères et de l'élevage. Rapport de synthèse Volume V, 66/88 T-TUN 61 FAO TCP/TUN/6652, 22 juin 1988.

Groupe Interprofessionnel des viandes rouges (GIVR), 2002. Étude sur l'engraissement des taurillons, 2002.

Jarvis M., et Lovell S., 1982. Cattle as capital goods and ranchers as portfolio managers: An application to the Argentine cattle sector" Journal of political economy pp:489-520, may / June 1982.

Jeffrey, M., 1998. Prospects for developing Malian red meat and livestock exports African Economic Policy Research Report July 1998.

Joandet G. E. et T. C. Cartwright, 1975. Modelling beef production systems" Texas A&M University, college station. Journal of animal science Vol. 41, N°4.

Leslie P.H., 1945. On the use of matrices in populations mathematics. Biometrika, 33: 182-212.

Leslie, P.H., 1948. On the distribution in time of the births in successive generations. Journal of the Statistical Society Series A, 111: 44-53.

Leslie, P.H., 1948. Some further notes on the use of the use of matrices in population mathematics. Biometrika, 35: 231-245.

Levine, J.M., Hohenboken, W. & Nelson, A.G. 1981. Simulation of beef cattle production systems in the llanos of Colombia. Part I: Methodology, an alternative technology for the tropics. Agricultural systems, 7, pp: 37-48.

Ministère de l'Agriculture (République Tunisienne), Direction Générale de la Planification, du développement et des Investissements Agricoles (DGPDI): Enquêtes Agricoles de base: (1974-2004).

Sanders O., et James, 1945. The TAMU beef cattle production model, Animal science Department Texas A&M University College Station Texas 77843.

Selmi A., B. Thabet, M. Roth, J.P. Chavas, L. Hamdi et A. Mechergui, 1991. Un modèle de programmation linéaire pour la planification agricole: cas du secteur public du Nord-Ouest.

Selmi I, 2002. Traitement de l'anoestrus postpartum chez la vache laitière par la buséréline et la progestérone. Thèse Doctorat. Vét. E.N.M.V. Sidi Thabet, 2002.

Upton, M., 1989. Livestock productivity assessment and growth models, Agricultural systems Vol. 29., pp 149-164, 1989.

Upton, M., 1993. Livestock productivity assessment and modelling, Agricultural systems Vol. 43., pp 459-472, 1993.

William F. Hahn, 1996. Documentation for the animal product Branch's cost-benefit calculation model for red meat and poultry. Economic research service, Washington, DC 20005-4788, April 1996.