

Modéliser les pratiques décisionnelles et les flux d'azote à l'échelle globale de l'exploitation : cas de l'élevage bovin laitier en contexte tropical insulaire

VAYSSIERES J. (1), LECOMTE P. (1)

(1) CIRAD, UR Systèmes d'Élevage, 7 ch. de L'IRAT, 97410 St-Pierre, La Réunion

RESUME – Rares sont les modèles de simulation qui représentent l'exploitation agricole dans sa globalité. GAMEDE (*Global Activity Model for Evaluating the sustainability of Dairy Enterprises*) représente les actions de conduite d'une exploitation bovine laitière complète et les flux de matières générés au sein de l'exploitation et avec son environnement. Ce modèle articule un système décisionnel (qui simule la réalisation de dix-neuf opérations de conduite) à un système biophysique complexe constitué de six modules (représentant entre autres des mécanismes biologiques à la fois animaux et végétaux). Parvenir à un tel niveau d'intégration repose sur la complémentarité disciplinaire et suppose de revoir les approches de modélisation classiques. De même, les validations classiques confrontant le simulé à l'observé ne sont pas forcément les seules méthodes pertinentes quand on représente dynamiquement, à un pas de temps quotidien, le fonctionnement d'un agro écosystème aussi complexe.

Modelling decisional practices and nitrogen flows at the whole farm scale: the case of dairy farming on a tropical island

VAYSSIERES J. (1), LECOMTE P. (1)

(1) CIRAD, UR Systèmes d'Élevage, 7 ch. de L'IRAT, 97410 St-Pierre, La Réunion

SUMMARY – Simulation models that represent the farm as a whole are quite scarce. GAMEDE (*Global Activity Model for Evaluating the sustainability of Dairy Enterprises*) focusses on the management actions of a dairy farm and the subsequent matter flows within the farm and towards its environment. The model articulates a decision system that simulates the realisation of 19 technical operations with a complex biophysical model made of six modules representing both animal and vegetal biological processes. Aiming at such a level of integration supposes a multidisciplinary coordination and differs from the classical modelling approaches. In our case, the classical validations that compare simulated vs observed data are not necessarily the only pertinent methods when representing dynamically, on a daily basis, the functioning of such a complex agro ecosystem.

INTRODUCTION

À la Réunion, du fait de fortes contraintes foncières l'élevage bovin laitier (EBL) est généralement basé sur une utilisation importante d'intrants (concentrés, engrais minéraux...) Une première évaluation de l'impact environnemental en terme d'excédents azotés à l'échelle des systèmes d'exploitation a montré que la diversité des pratiques individuelles se traduisait par une large gamme de performances environnementales (Vayssières *et al.*, 2006). Avec pour objectif de mieux comprendre et représenter l'incidence des pratiques de conduite dans ces élevages sur leurs résultats environnementaux, un modèle de flux de matière, GAMEDE, a été construit. Il représente les flux entre l'exploitation et son environnement et les flux au sein de l'exploitation. Cette communication a pour objectif de présenter l'approche de modélisation utilisée pour représenter l'exploitation dans sa globalité, éleveur inclus.

1. APPROCHE DE MODELISATION

1.1. DU SYSTEME A LA PLURI DISCIPLINARITE

L'EBL peut être vue comme un ensemble de stocks reliés par des flux de matières de différentes natures (animaux, lait, effluents, fourrages...). Certains flux résultent d'actions décidées et réalisées par l'éleveur : les « flux actionnables », d'autres, découlent de processus biophysiques, qui ne lui sont pas directement accessibles : les « flux biophysiques ». L'existence de flux soumis à la décision de l'éleveur a conforté l'intégration d'un système décisionnel (SD) et d'un système biophysique (SB) dans GAMEDE. En référence aux travaux de Cros *et al.* (2001) le développement d'un SD en lien avec un SB est un moyen de représenter les pratiques des éleveurs. L'existence de ces deux systèmes nous a conduit à mobiliser des concepts et des méthodes à la fois des sciences sociales et des sciences biophysiques.

De plus, GAMEDE représente un système associant la conduite de cultures et l'élevage d'animaux. La nature du modèle a donc nécessité la mise en place d'un groupe de travail pluridisciplinaire. Ainsi, la conception de GAMEDE a mobilisé six éleveurs, trois techniciens, huit chercheurs biophysiciens (trois zootechniciens, un vétérinaire, deux agronomes du végétal / sol, un écologue pastoraliste, deux modélisateurs), quatre chercheurs en sciences sociales (un ethnologue, un ingénieur de la connaissance, un ergonomiste, un économiste). Chaque acteur a participé pendant au moins une semaine au travail de modélisation.

1.2. CINQ ETAPES DE MODELISATION

Concernant la construction de GAMEDE, cinq étapes de modélisation ont pu être identifiées :

- 1) Modélisation conceptuelle du modèle de flux de matière et description des phénomènes biophysiques à représenter.
- 2) Représentation de la diversité des profils décisionnels des éleveurs laitiers et conception du SD.
- 3) Inventaire puis sélection, dans la bibliographie, de modèles partiels permettant de simuler les phénomènes biophysiques à intégrer dans le SB, en tenant compte des objectifs de modélisation et des données disponibles à la Réunion.
- 4) Implémentation puis paramétrage des modèles biophysiques partiels avec des données locales.
- 5) Simulation de scénarios réels avec les modèles partiels comprenant leur évaluation à dire d'experts.
- 6) Compilation et implémentation des modèles biophysiques partiels et du SD sous la forme de GAMEDE.
- 7) Simulation de scénarios réels (EBL réels) avec GAMEDE et évaluation du modèle.

1.3. CONSTRUCTION DU SYSTEME DECISIONNEL

Dans cette étude une méthode multi outils et multi étapes a été mise en œuvre pour concevoir le SD et identifier les

règles de décision en vue de son paramétrage. En effet, quatre types d'enquêtes en exploitation ont été mobilisés sur quatre années :

- 1) des immersions inspirées par les approches ethnographiques mais conçues pour identifier des règles de décisions opérationnelles (prises au quotidien) concernant des actions techniques (1 semaine par EBL en année 1),
- 2) des enquêtes rapides de type entretiens semi-directifs (2 heures par EBL en année 1),
- 3) des suivis de pratiques d'exploitation permettant l'observation de l'état du système de production : stocks de fourrage, composition du troupeau, hauteur d'herbe sur les parcelles (un jour par EBL tous les deux mois pendant 2,5 ans en années 1 à 3),
- 4) des réunions collectives (1/2 journée tous les trois mois pendant 2,5 ans en années 2 à 4).

Les enquêtes rapides ont concerné 35 EBL (25 % des EBL réunionnais). Les trois autres types d'enquêtes ont concerné six éleveurs tout particulièrement choisis pour représenter la diversité des profils décisionnels (en référence à une typologie de combinaison de pratiques : Vayssières *et al.*, 2006) et des zones d'élevage (en référence à un zonage à dire d'experts). Ces six éleveurs ont étroitement participé à la conception de GAMEDE et plus particulièrement à la conception du SD.

1.4. CONSTRUCTION DU SYSTEME BIOPHYSIQUE

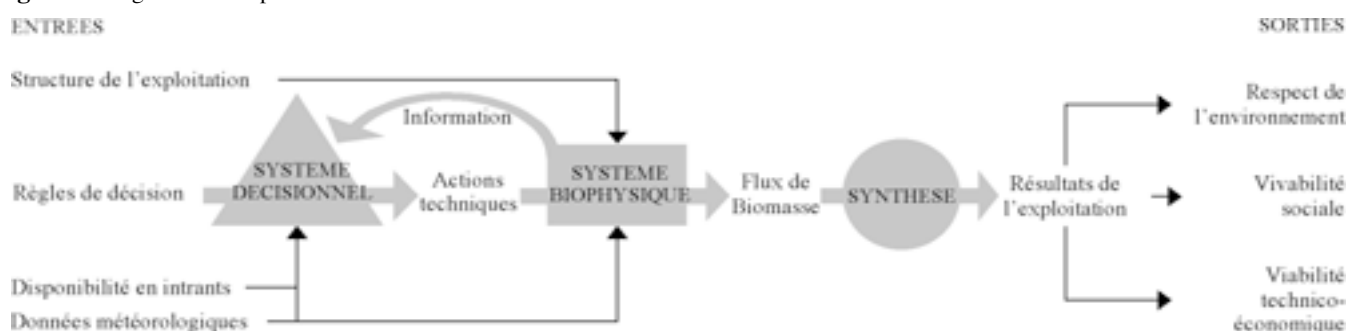
Concernant le SB il préexistait un ensemble de modèles partiels traitant de façon précise des processus spécifiques. L'un des enjeux majeur a été d'adapter ces modèles au contexte local et de les coupler pour construire un unique SB global.

La construction du SB s'est opérée en deux temps :

2) Le premier a concerné la reconstruction des modules (= modèles biophysiques partiels) à partir de modèles publiés. Pour chaque processus (listés en § 2.3.), la principale difficulté a généralement été de choisir dans une grande diversité de modèles disponibles (modèles mécanistes ou empiriques, modèles d'optimisation ou de simulation) un modèle adapté aux objectifs de représentation, aux données disponibles localement pour son paramétrage et, enfin, selon l'accessibilité de l'algorithme. Deux modèles, le Module de Conditionnement des Fourrages (MCF) et le Module d'Emissions Azotées (MEA) (décrits dans le § 2.3.), ont tout spécialement été conçus pour les besoins de GAMEDE faute de modèle adéquat dans la bibliographie. Dans tous les cas, les modules ont été paramétrés à partir de données issues d'expérimentations locales.

2) Le deuxième temps a concerné l'intégration de l'ensemble des modules dans un cadre unique, homogène et « actionnable » par le SD. L'assemblage des différents modules a porté une attention particulière à ce que les sorties de modules constituent les entrées d'autres modules afin de suivre le cycle de matière dans l'exploitation.

Figure 1 : Algorithme simplifié de GAMEDE



2. DESCRIPTION DU MODELE

2.1. PRINCIPE DU MODELE DE SIMULATION

GAMEDE est un modèle de simulation développé sous système dynamique hybride (VENSIM®). Il représente les actions réalisées chaque jour par l'éleveur et l'état quotidien du système de production (e.g. les flux d'azote).

Les variables d'entrée de GAMEDE concernent : 1) la structure de l'exploitation (taille initiale du troupeau, parcellaire, capacité de la fosse à lisier...), 2) la stratégie de l'éleveur sous la forme de règles de décision et 3) l'environnement de l'exploitation en terme météorologique (données quotidiennes de pluie, température, rayonnement, ETP...) et de disponibilité des intrants (fourrages, fertilisants organiques...).

Le SD de GAMEDE simule les actions techniques de l'éleveur en fonction de ses règles de décision, de l'état du système de production et de son environnement. Le SB traduit les actions techniques en flux actionnables et simule les flux biophysiques tous deux déterminés par les conditions météorologiques quotidiennes. Une synthèse traduit les flux de matière en flux d'azote et calcule trois types d'indicateurs de durabilité : 1) des indicateurs environnementaux (bilan et efficacité azotés), 2) des indicateurs sociaux (temps de travail et temps d'astreinte), et des indicateurs techniques (productivité prairiale et laitière). Un module d'évaluation économique, dont la forme conceptuelle est achevée, va prochainement être intégré à GAMEDE.

2.2. CONTENU DU SYSTEME DECISIONNEL

Le SD définit les actions techniques réalisées au jour le jour selon l'état du système de production, le temps de travail disponible, les priorités entre opérations et les contraintes de réalisation des actions. La forme conceptuelle du SD est la « *Structure for Action Modelling* » (SAM) conçue pour les besoins de GAMEDE (Vayssières *et al.*, 2007). Cette structure conceptuelle est suffisamment générique pour formaliser comment toute action technique est réalisée. La SAM est composée d'un ensemble de variables descriptives des opérations techniques et des règles de décision correspondantes. Ces règles ont été reconstruites par le chercheur modélisateur avec la participation des six éleveurs. La SAM prévoit la réalisation de l'action en trois temps : une première liste d'opérations techniques, les « opérations à réaliser », est produite. Un second sous ensemble d'opération est sélectionné dans cette première liste : les « opérations réalisables » compte tenu d'un ensemble de contraintes à vérifier relatives à la disponibilité des ressources (main d'œuvre, matériel, matière) et aux conditions climatiques. Dans un troisième temps les « opérations effectivement réalisées » sont caractérisées en vue de leur traduction en flux de matière. Chacune des trois étapes fait intervenir un type de règles particulier.

En référence aux travaux concernant le modèle d'action (Duru *et al.*, 1988), les opérations sont déclenchées et caractérisées soit par le plan d'action de l'éleveur (environ quatre-vingt dix règles de décision tactiques à renseigner), soit de façon contextuelle en autorisant des ajustements possibles par rapport au plan en fonction d'aléas (plus de trois cents règles de décision opérationnelles à renseigner). Dans la version actuelle de GAMEDE les actions réalisées répondent au plan.

En termes mathématiques, la réalisation d'une opération technique est représentée par une variable binaire (figure 2).

2.3. CONTENU DU SYSTEME BIOPHYSIQUE

Le système biophysique comprend six modules inter connectés. 1) Le Module de Production de Fourrages verts (MPF) simule la croissance de diverses graminées prairiales et de la canne à sucre dans quatre zones pédoclimatiques tropicales différentes (zones sèches d'altitude à zones côtières hyper humides). Cette croissance est fonction des pratiques de récolte et de fertilisation. Ce module végétal est inspiré de deux modèles de la bibliographie : le MCP pour la prairie (Leteinturier *et al.*, 2004) et MOSICAS pour la canne à sucre (Martiné, 2003). 2) Le MCF simule l'évolution des fourrages prairiaux suite à leur enrubannage selon la nature initiale du fourrage, les conditions climatiques dans lesquelles le chantier est réalisé et la quantité de conservateur ; ce module original a été conçu à partir des données de Paillat (1995). 3) Le Module de Production Animale (MPA) simule la production de lait, de déjections animales et l'évolution du poids des animaux selon la ration ingérée en distinguant vingt-et-une classes d'animaux (veaux, génisses, vaches tarées et en production). Ce module, basé sur le système UF/ PDI, a principalement mobilisé des équations du logiciel de rationnement INRation (Faverdin *et al.*, 2007), complétées par celles de CNCPS pour la production de déjections (Fox *et al.*, 2004). 4) Un Module de Démographie (MD) calcule les effectifs des vingt et une classes d'animaux selon des paramètres de reproduction / mortalité et la stratégie de réforme / renouvellement de l'éleveur. Ce module est inspiré de GEDEMO (Coquil *et al.*, 2005). 5) Le MEA simule le devenir des effluents d'élevage au cours de leur gestion (bâtiment, stockage, conditionnement, épandage) selon quatre voies possibles : restitution au pâturage, lisier, fumier et fumier+compostage. Ce module est original ; les facteurs d'émission sont issus de la bibliographie. 6) Le dernier Module concerne le Pâturage (MP). Il simule la défoliation et l'ingestion d'herbe pâturée par les animaux selon leur capacité d'ingestion (diminuée de l'ingéré à l'auge), le temps de pâturage et l'abondance de l'herbe disponible sur la parcelle. Le MP est essentiellement inspiré de SEPATOU (Cros *et al.*, 2003) et GRAZEIN (Delagarde *et al.*, 2004).

3. DISCUSSION : ORIGINALITE ET VALIDATION DU MODELE

L'originalité de GAMEDE est qu'il simule de façon dynamique, à un pas de temps quotidien et sur plusieurs années, la réalisation de la totalité des opérations de conduite, l'état des flux et des stocks de matière de l'ensemble de l'exploitation. Un schéma synthétique (figure 2) montre le type de représentations proposées par le modèle.

L'approche de modélisation constitue une autre originalité. Classiquement, la quantification des flux se fait en domaines expérimentaux (Modim-Edman, 2007). Ici la quantification a été réalisée *in situ* ; elle permet ainsi une validation d'un

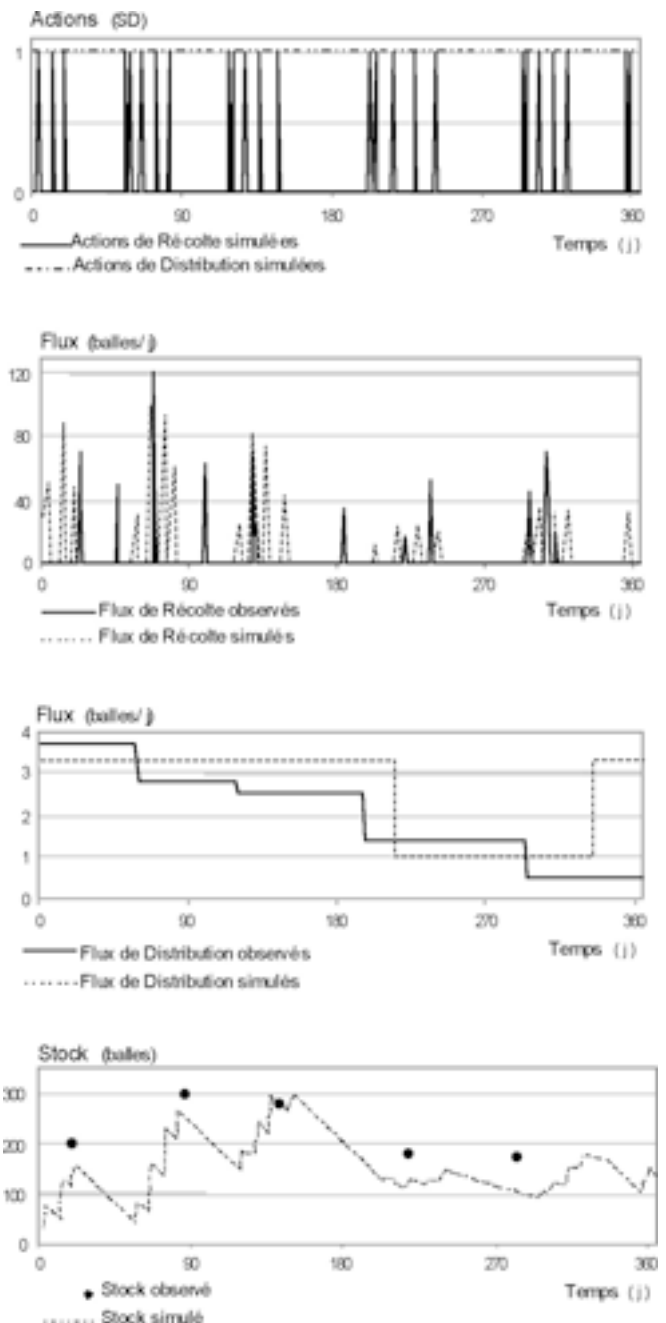
modèle destiné à représenter des systèmes réels sur la base de données recueillies dans des systèmes représentatifs de l'existant. Les limites sont que la précision, la finesse et l'exhaustivité des données recueillies atteignent rarement celles de données expérimentales.

3.1. CONFRONTATION DU SIMULE A L'OBSERVE EN FERMES REELLES

La quantification des flux et des stocks de matières intra année en fermes réelles a pu être conduite sur deux années grâce au suivi des six exploitations. Ce suivi offre un jeu de données pour confronter le simulé à l'observé aussi bien en intra annuel qu'à une échelle annuelle.

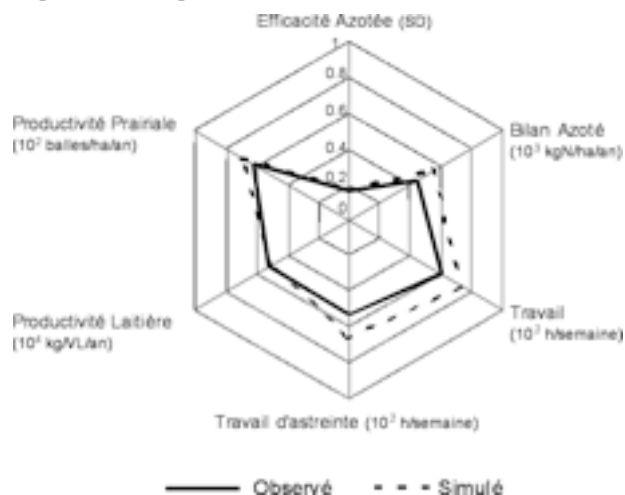
En figure 2, l'exemple de la gestion des stocks d'enrubannage illustre la validation quantitative intra annuelle des flux et des stocks de l'exploitation. La gestion de ce stock comprend la récolte du fourrage et l'alimentation des animaux qui génèrent respectivement des flux entrants et sortants.

Figure 2 : Simulation dynamique des actions de conduite, des flux et des stocks : cas de la gestion du stock d'ensilage de l'exploitation 3 sur l'année 2006



De même les bilans annuels peuvent être confrontés aux indicateurs observés (figure 3). Les bilans annuels proposés sont, pour les six exploitations, plus justes que les représentations intra annuelles. Ces écarts proviennent en particulier du fait que les actions de conduite, à l'origine de nombreux flux, sont en pratique souvent réalisées de manière différente de ce qui est prévu par le plan ; or les simulations proposées par la forme actuelle de GAMEDE sont basées sur le plan d'action de l'éleveur. Des simulations avec des ajustements possibles de ce plan, sur la base des règles opérationnelles décrites par Vayssières *et al.* (2007), sont prévues.

Figure 3 : Bilan annuel sur 6 critères de la durabilité de l'exploitation n°3 pour l'année 2004



3.2. VALIDATIONS A DIRE D'EXPERTS

Chacun des six modules biophysiques a individuellement fait l'objet de validations à dire d'experts sur la base de simulations de scénarios réels. Pour chaque module, trois types d'experts sont intervenus successivement pour évaluer le réalisme des simulations : un chercheur du domaine biophysique concerné, un technicien compétent et un à trois éleveurs dont les pratiques ont été simulées. Si l'on prend l'exemple du MPF, son réalisme a été évalué sur la base des productions de fourrages simulées dans plusieurs zones d'élevage et à différents niveaux de fertilisation.

Concernant la validation du modèle complet, l'évaluation du réalisme des simulations a suivi une démarche similaire mis à part le fait qu'elle a été précédée d'une phase importante de vérification de la cohérence globale des représentations produites par GAMEDE entre elles et avec la connaissance acquise sur les systèmes de production enquêtés. Cette vérification a concerné les actions, les flux / stocks et les résultats d'exploitation. A titre d'exemples, il s'agissait de vérifier que l'azote ne s'accumulait pas anormalement dans un des stocks de l'exploitation ou qu'une stratégie attachant peu d'importance à la valorisation des effluents d'élevage conduisait bien à des risques de débordements de fosse à lisier. La vérification a été conduite par le premier auteur, modélisateur agro zootechnicien. Le fait que ce dernier ait accompli à la fois le travail d'enquête et de modélisation dans six exploitations très différentes lui a permis d'acquérir l'expertise nécessaire à la vérification de la cohérence des représentations.

3.3. VALIDATION PAR L'USAGE

Les perspectives d'application de GAMEDE sont multiples. Il sera dans un premier temps utilisé auprès d'éleveurs pour évaluer avec eux les répercussions d'alternatives techniques qui pourraient être directement envisagées sur l'exploitation. L'encadrement technique est également intéressé par le

modèle afin d'alimenter ses réflexions sur les modèles de productions innovants. Tout un ensemble de méthodes de validation, dites « validations par l'usage », pourront alors être envisagées selon les objectifs attendus :

- validation par la pertinence et la crédibilité (Rykiel, 1996) des réponses apportées aux décideurs dans le cas d'une utilisation en tant qu'outil d'aide à la décision,
- validation par l'importance des échanges et des réflexions générées chez les acteurs dans le cas d'une utilisation en tant que modèle d'accompagnement,
- validation par le progrès généré dans le cadre d'une utilisation comme outil de développement, de formation et/ou de diffusion d'innovations.

CONCLUSION

GAMEDE, modèle de simulation du fonctionnement quotidien de l'exploitation dans sa globalité est à même de représenter une grande variété de stratégies et de structures d'élevages laitiers. Ces systèmes sont particulièrement complexes, d'autant plus qu'ils sont conduits dans des milieux pédoclimatiques variés (c'est le cas à La Réunion). Centrée sur l'élevage, cette approche pluridisciplinaire (interventions de chercheurs de disciplines connexes), interactive (échanges réguliers entre éleveurs et chercheurs) et itérative, a nécessité de nombreux aller retour entre les formes conceptuelles et les évaluations du modèle.

Etant donné le niveau de finesse des représentations proposées par GAMEDE à propos d'un système particulièrement complexe, une réflexion sur la manière de valider ce type de modèle est d'actualité. La validation classique confrontant le simulé à l'observé (Rykiel, 1996) peut être complétée par des validations globales impliquant les acteurs. Ces particularités doivent être prises en compte lorsqu'on représente un agro écosystème dans sa globalité.

Nous tenons à tout particulièrement remercier les six éleveurs qui ont participé à la construction de GAMEDE, les nombreux chercheurs venus en appui scientifique au cours de ce travail de modélisation, et F. Bocquier en tant que relecteur attentif.

- Coquil X., Faverdin P., Garcia F., 2005.** 3R, 12, p 213
Cros M.J., Duru M., Garcia F., Martin-Clouaire R., 2001. Env. Int., 27, 139-145
Cros M.J., Duru M., Garcia F., Martin-Clouaire R., 2003. Agr., 23, 105-122
Delagarde R., Faverdin P., Baratte C., Peyraud J.L., 2004. 3R, 11, 295-298
Duru M., Papy F., Soler L.G., 1988. CR Aca. Agr. Fra., 74, 81-93
Faverdin P., Delagarde R., Delaby L., Meschy F., 2007. In Alimentation des bovins, ovins et caprins. Besoins des animaux – valeurs des aliments. Editions Quae, Versailles, 23-55
Fox D.G., Tedeschi L.O., Tylutki T.P., Russell J.B., Van Amburgh M.E., Chase L.E., Pell A.N., Overton T.R., 2004. Ani. Feed Sci. & Tech., 112, 29-78
Leteinturier B., Oger R., Buffet D., 2004. Rapport technique sur le nouveau module de croissance prairiale, Centre de Rech. Agro. Gembloux, Belgique, 37 p
Martiné J.F., 2003. PHD, 116 p
Modin-Edman A.K., Öborn I., Sverdrup H., 2007. Agri. Sys., 94, 431-444
Paillat J.M., 1995. PHD, 190 p
Rykiel E.J., 1996. Eco. Mod., 90, 229-244
Vayssières J., Lecomte P., Guerrin F., Bocquier F., Verdet C., 2006. RAMIRAN, 12, 57-60
Vayssières J., Lecomte P., Guerrin F., Nidumolu U.B., 2007. Animal, 1, 716-733