

Intérêts et limites de la prise en compte de la variabilité individuelle dans les modèles de fonctionnement du troupeau

L. PUILLET^{1,2,3,4}, D. SAUVANT^{3,4}, M. TICHIT^{1,2}

¹ INRA, UMR1048 Activités Produits Territoires, 16 rue Claude Bernard, F-75231 Paris, France

² AgroParisTech, Activités Produits Territoires, 16 rue Claude Bernard, F-75231 Paris, France

³ INRA, UMR791 Modélisation Systémique Appliquée aux Ruminants, 16 rue Claude Bernard, F-75231 Paris, France

⁴ AgroParisTech, Modélisation Systémique Appliquée aux Ruminants, 16 rue Claude Bernard, F-75231 Paris, France

Courriel : Laurence.Puillet@agroparistech.fr

La variabilité des réponses biologiques individuelles est une propriété complexe du fonctionnement d'un troupeau. Les modèles sont des ressources méthodologiques à même d'appréhender la complexité de cette propriété et de produire des connaissances pour mieux la piloter et la valoriser. Cet article examine l'opérationnalité des modèles de fonctionnement du troupeau développés ces dernières années pour étudier la variabilité individuelle.

La variabilité individuelle est une composante clé du fonctionnement des systèmes d'élevage. Le regain d'intérêt des zootechniciens pour la variabilité individuelle est en lien avec l'évolution de la recherche, depuis une vision fondée sur l'animal moyen à celle d'une collection hétérogène et renouvelée d'animaux (Dedieu *et al* 2008). La variabilité individuelle a été initialement étudiée dans le contexte des systèmes extensifs où elle constitue un élément clé du diagnostic zootechnique (Lasseur et Landais 1992). Elle a été également envisagée comme un atout qui permet au troupeau de s'adapter à un environnement contraignant (Gibon 1994). Dans les systèmes intensifs, la variabilité individuelle était plutôt perçue comme un obstacle à l'application de modèles de conduite. Cependant, de nombreux travaux suggèrent que l'homogénéisation des performances animales a atteint ses limites. Dans le domaine de la génétique, la sélection basée sur un critère de production unique a conduit à une détérioration des autres composantes de la performance (baisse de la fertilité des races laitières, Knaus 2009 ; problèmes de qualité des produits des races allaitantes, Webb et Casey 2010). Dans le domaine de la nutrition, la prédiction des besoins moyens d'un lot s'appuie sur un certain nombre de paramètres visant à synthétiser la variabilité (principalement l'âge, le stade de lactation, le niveau de production, le poids vif et l'état corporel).

Cependant la détermination des apports alimentaires sur la base des besoins moyens ne permet pas d'exprimer le potentiel de tous les animaux. La production du lot est alors inférieure à la moyenne des potentiels (Brossard *et al* 2009). Ces limites font émerger de nouvelles questions de recherche autour de la variabilité individuelle. Certains auteurs s'intéressent maintenant à l'amplitude de la variabilité individuelle de certains paramètres métaboliques pour pouvoir établir des stratégies d'alimentation qui minimisent les risques de maladies ou de problèmes de reproduction (Ingvarsen et Friggens 2005). D'autres auteurs cherchent à dissocier la part de variabilité liée à la femelle de celle liée à l'environnement pour pouvoir à terme sélectionner des aptitudes individuelles intéressantes (travaux de Mialon *et al* 2001 sur la capacité à revenir en chaleur après la mise bas).

Ainsi, la compréhension et le pilotage de la variabilité individuelle sont des enjeux de recherche forts que ce soit pour des systèmes de production extensifs ou intensifs. La variabilité individuelle a de nombreux déterminants et son rôle dans le fonctionnement du troupeau est une question difficile à traiter. Les modèles constituent une ressource méthodologique pour améliorer notre compréhension des interactions entre les pratiques de conduite et le fonctionnement des animaux et faire progresser notre capacité à prédire les réponses du

troupeau aux pratiques de conduite (Tichit *et al* 2009). En particulier, les modèles peuvent à la fois intégrer les interactions complexes entre les facteurs à l'origine de la variabilité et également dissocier les effets de ces différents facteurs sur la variabilité. Ils constituent ainsi des outils susceptibles de produire des connaissances qui permettront, à terme, de mieux piloter la variabilité individuelle dans les troupeaux.

Depuis une vingtaine d'années, de nombreux modèles de fonctionnement du troupeau ont été développés. L'objectif de cette synthèse bibliographique est d'analyser dans quelle mesure les modèles existants sont opérationnels pour étudier le rôle de la variabilité individuelle. Nous présenterons tout d'abord le cadre d'analyse de cette synthèse, à savoir les composantes de la variabilité individuelle et les modèles retenus dans cette analyse. Nous aborderons ensuite successivement la façon dont les modèles ont représenté les réponses biologiques des animaux, c'est-à-dire la composante animale de la variabilité, puis la façon dont ils ont représenté les pratiques de conduite, c'est-à-dire la composante décisionnelle de la variabilité. Enfin nous discuterons les limites des modèles pour dégager les grandes lignes du cahier des charges d'un modèle pour l'étude de la variabilité individuelle et les implications en termes de besoins de recherche.

1 / Cadre d'analyse

1.1 / Composantes de la variabilité individuelle

Proposer des systèmes de conduite qui tirent parti de la variabilité individuelle nécessite de comprendre comment celle-ci se construit dans le troupeau (figure 1). Deux grandes composantes sont à l'origine de la variabilité individuelle dans le troupeau : une composante animale et une composante décisionnelle.

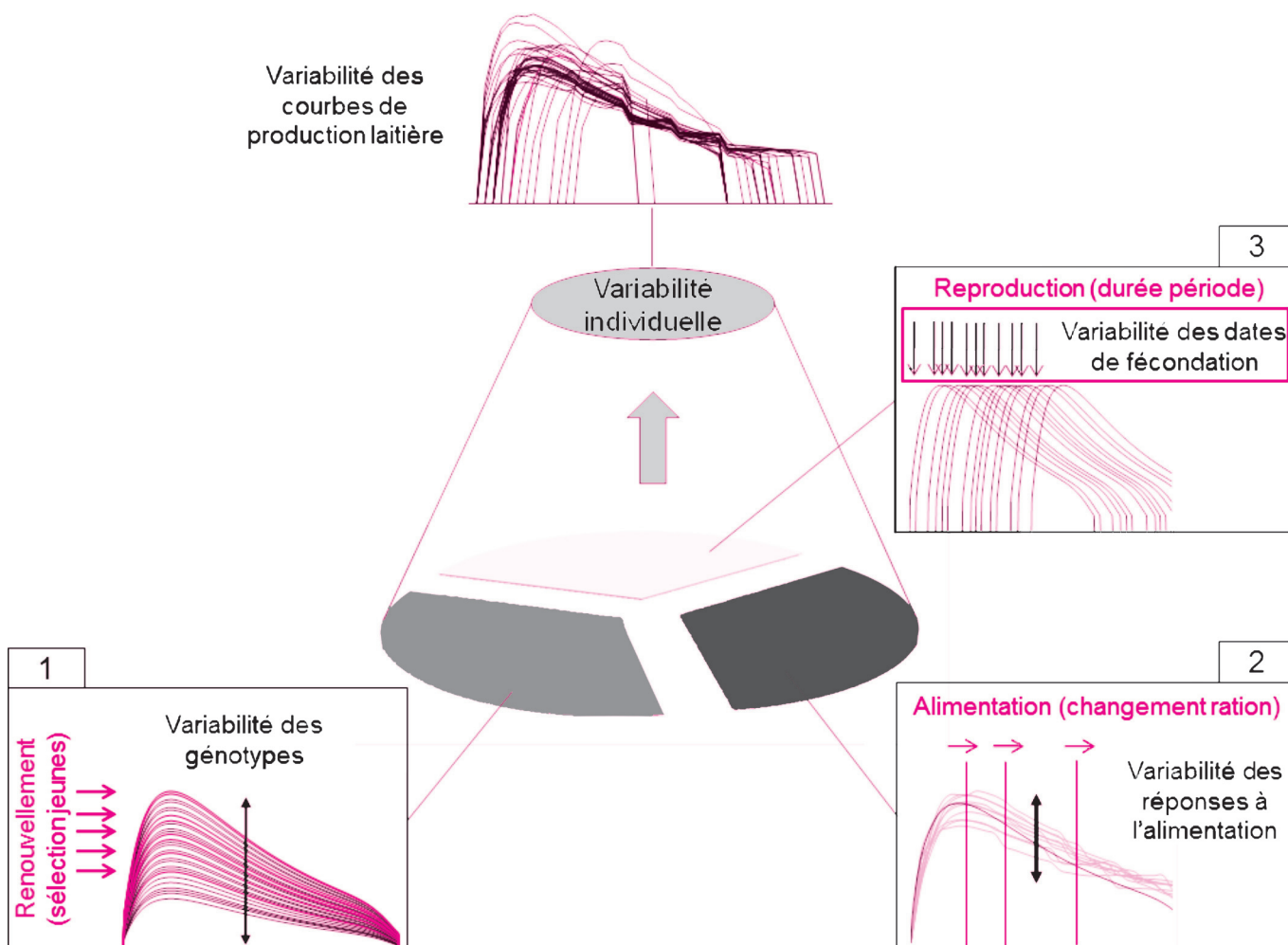
La composante animale de la variabilité repose tout d'abord sur la variabilité génétique inter-individus : les animaux sont caractérisés par des niveaux de potentiel de production différents (laitier ou de croissance par exemple). Ensuite, il existe une variabilité reposant sur l'expression du génotype, c'est-à-dire le fonctionne-

ment biologique des animaux. Les réponses d'un animal sont déterminées par l'expression des différentes fonctions physiologiques qui dépend de l'allocation de nutriments à chacune d'entre elles. L'allocation des nutriments est un processus hautement régulé qui implique différents niveaux de contrôle. A long terme, les régulations dites d'homéorhèse pilotent les priorités entre fonctions physiologiques par rapport au prélèvement de nutriments (par exemple, priorité de la mamelle en début de lactation) pour exprimer le potentiel de production. A court terme, les régulations dites d'homéostasie pilotent l'équilibre du milieu interne de l'animal (par exemple, régulation de la glycémie sanguine) en réponse aux variations d'apports alimentaires. Ces deux niveaux de régulations sont une des sources majeures de variabilité des réponses biologiques et des capacités d'adaptation des animaux à leur environnement.

La composante décisionnelle de la variabilité individuelle est liée à l'environnement d'élevage, et plus particulièrement aux pratiques de conduite. Les pratiques ont des effets variés sur les réponses animales : elles pilotent différentes variables biologiques, à différents pas de temps. Par exemple, les pratiques de renouvellement déterminent l'entrée et la sortie d'un animal du troupeau, conditionnant ainsi sa longévité ; les pratiques de reproduction déterminent le rythme des cycles gestation-lactation et donc la succession des stades physiologiques ; les pratiques d'alimentation déterminent le niveau et le rythme de distribution des ressources à l'animal. Certaines pratiques génèrent également de la variabilité car elles mobilisent des informations produites à différents niveaux d'organisation du troupeau (animal, lot, troupeau). Les pratiques de réforme mobilisent des informations au niveau du troupeau (taille et taux de renouvellement) pour déterminer le

Figure 1. Représentation de la construction de la variabilité individuelle dans le troupeau.

L'exemple est basé ici sur la variabilité des courbes de productions laitières. Cette variabilité peut être décomposée de façon théorique en 1) une variabilité liée au génotype des femelles, 2) une variabilité liée aux réponses à l'alimentation et 3) une variabilité liée aux stades physiologiques. Chaque élément est le résultat de l'interaction entre le fonctionnement biologique des animaux, *i.e.* la composante animale (flèches noires) et les pratiques de conduite, *i.e.* la composante décisionnelle (flèches rouges). La flèche centrale illustre l'agrégation des éléments, qui génère la variabilité individuelle dans le troupeau.



nombre de femelles à réformer puis mobilisent des informations au niveau des animaux (critères d'âge, de production...) pour déterminer les femelles réformées. Les effets multivariés des pratiques créent finalement pour chaque animal un microenvironnement au sein du troupeau.

1.2 / Modèles analysés

Les modèles retenus dans notre analyse sont des modèles de recherche qui simulent le fonctionnement de troupeaux de ruminants, laitiers ou allaitants. Nous n'avons pas cherché à être exhaustifs. Tout d'abord, les modèles qui correspondent à des adaptations de modèles déjà publiés n'ont pas été retenus, comme par exemple les modèles de Kahn et Spedding (1983) ou de Bourdon et Brinks (1987) qui sont des adaptations du modèle de Sanders et Cartwright (1979). Ensuite, nous n'avons pas retenus dans l'analyse les modèles d'optimisation (par exemple Kristensen 1987, Vargas *et al* 2001). En effet, l'optimisation dynamique implique de limiter le nombre d'états et de contrôles du système pour éviter les problèmes d'explosion combinatoire. Le corollaire de cette contrainte technique est que les modèles d'optimisation fixent la variabilité a priori (limite du nombre d'états) et représentent les pratiques de façon frustrée (limite du nombre de contrôles). Du point de vue des catégories de pratiques (au sens de Landais 1987), nous nous sommes limités aux modèles simulant les pratiques de conduite (alimentation et reproduction), de renouvellement et d'agrégation qui sont à l'origine du processus de production d'un troupeau. Nous n'avons pas traité les pratiques d'exploitation et de valorisation des produits. Ces dernières sont potentiellement source de variabilité mais se situent en aval du processus de production. Enfin, les travaux de modélisation du système fourrager où le troupeau est représenté comme une fonction de prélèvement constante (par exemple, Cros *et al* 2001) n'ont pas été considérés. Au final, nous avons retenu 35 modèles de fonctionnement du troupeau dont la majorité a été développée pour les systèmes bovins allaitants (40%) et laitiers (31%), et une minorité pour les systèmes ovins et caprins (20 et 9% respectivement).

2 / Représentation de la composante animale

2.1 / L'animal, un ensemble de variables liées à l'âge et la reproduction

Dans environ un quart des modèles étudiés (9 sur 35), l'animal est représenté

par des variables associées à sa fonction de reproduction ou associées à son âge ou à la combinaison des deux (tableau 1).

Dans certains modèles, le fonctionnement du troupeau est associé uniquement au processus de reproduction, qui pilote les changements de stades physiologiques. L'animal est représenté par son stade physiologique, sans considération de son âge. La structure démographique du troupeau n'est donc pas prise en compte. Le modèle de Benoit (1998) simule l'évolution temporelle de la répartition des effectifs de brebis vides ou en gestation dans deux groupes de lutte. Ces groupes diffèrent par la fertilité des brebis qui les composent (effet de la saison). Une proportion donnée de femelles restées vides après la lutte peut être transférée dans l'autre groupe de lutte afin d'avoir une nouvelle opportunité de reproduction. Denham *et al* (1991) considèrent qu'en plus d'être vides ou en gestation, les femelles peuvent être cyclées. Les modèles de Benoit (1998) et Denham *et al* (1991) sont déterministes : les femelles ont toutes la même probabilité d'être cyclée ou de concevoir. Pleasants (1997) représente également l'animal par son stade physiologique mais le changement de stade est déterminé de façon aléatoire, à partir de distributions de probabilités de conception et de durée de gestation. La distribution des mises bas est prédite à partir de la combinaison de ces deux distributions.

Dans d'autres modèles, le fonctionnement du troupeau est associé aux processus de reproduction et de mortalité, qui pilotent la répartition des effectifs du troupeau. L'animal est représenté par son âge. Dans les modèles matriciels de Schmitz (1997) et de Lesnoff (1999), les animaux du troupeau sont répartis dans des classes d'âge et de sexe. Les effectifs présents dans chaque classe varient en fonction de probabilités de survie et de fertilité. La probabilité de survie modifie les effectifs de chaque classe en entraînant des sorties d'animaux (mortalités) et la probabilité de fertilité modifie les effectifs en créant des animaux dans la classe initiale (naissances). Ces probabilités dépendent de la classe d'âge (par exemple, les classes d'animaux âgés ont une probabilité de survie plus faible). Ces modèles permettent ainsi d'étudier la variation de la structure démographique du troupeau en fonction des probabilités de survie et de fertilité.

Enfin, dans certains modèles, le fonctionnement du troupeau est associé aux processus de reproduction et de mortalité, qui pilotent à la fois les changements de stades physiologiques et la réparti-

tion des effectifs. L'animal est représenté à la fois par son âge et par son stade physiologique. Dans le modèle d'Azzam *et al* (1990) les animaux sont regroupés dans des classes d'âge. Dans chaque classe, les animaux ont une probabilité d'atteindre la puberté, de devenir cyclique et d'être gravide. Dans cette approche, le processus de reproduction est décomposé en une succession d'états physiologiques (pubère, cyclique, fécondée...). Les transitions entre états dépendent de l'âge ou encore de certains événements qui se produisent de façon aléatoire (par exemple l'occurrence d'une dystocie à la mise bas, générée par une distribution de probabilité, influence la durée de l'œstrus post-partum). La décomposition du processus de reproduction en une succession d'états physiologiques a été approfondie dans les modèles individualisés. Johnson et Notter (1987) représentent chaque individu par un taux de conception à la première saillie et une durée d'œstrus post-partum. Ces deux variables sont déterminées aléatoirement afin d'analyser la relation entre leur variance et la variance du taux de mise bas annuel du troupeau. Oltenacu *et al* (1980) proposent un découpage fin du processus de reproduction sur la base d'un enchaînement d'événements biotechniques : une mise bas est le résultat d'une ovulation, de l'apparition d'un œstrus, de la détection de cet œstrus, de la fécondation et de l'absence de mortalité embryonnaire. Les probabilités d'occurrence de ces événements dépendent de l'âge et de certains aspects techniques de la conduite (par exemple le taux de détection des chaleurs, la technicité de l'inséminateur). Cournut et Dedieu (2004) proposent un découpage moins fin du processus de reproduction mais intègrent les effets du passé reproductif des animaux sur leur performances : les probabilités de fertilité et de fécondation d'une femelle dépendent de sa réussite ou de son échec lors de la session de reproduction précédente. La décomposition du processus de reproduction en une succession d'états physiologiques s'appuie sur l'utilisation d'importantes bases de données. Ces bases de données permettent d'obtenir les distributions de probabilités ou les relations entre variables décrivant le stade de l'animal.

Les modèles qui simulent l'animal sur la base de son âge ou de variables associées à la reproduction ont été développés dans le contexte des systèmes allaitants, principalement bovins (6 modèles sur 9, tableau 1). Dans ce type de production, les modèles ont été développés pour étudier les facteurs qui influencent la **productivité numérique**, élément déterminant des performances globales du troupeau. Ainsi, la représentation de

Tableau 1. Représentation de la composante animale dans les modèles de fonctionnement du troupeau.

Les références sont présentées par type de représentation puis par ordre chronologique.

Variables associées à l'animal	Référence	SP ¹	Modèle Individu-centré
Reproduction	Oltenacu <i>et al</i> 1980	BL	•
	Johnson et Notter 1987	BA	•
	Azzam <i>et al</i> 1990	BA	
	Denham <i>et al</i> 1991	BA	
	Pleasants 1997	BA	
	Schmitz 1997	BA	
	Benoit 1998	OV	
	Lesnoff 1999	OV	
	Courmut et Dedieu 2004	OV	•
Production potentielle	Congleton 1984	BL	•
	Dijkhuizen <i>et al</i> 1986	BL	•
	Marsh <i>et al</i> 1987	BL	•
	Upton 1993	BA	
	Rotz <i>et al</i> 1999	BL	
	Shalloo <i>et al</i> 2004	BL	
	Ezanno 2005	BA	
	Rotz <i>et al</i> 2005	BA	
	Guimaraes <i>et al</i> 2009	CA _L	
Réponses à l'alimentation	Sanders et Cartwright 1979	BA	
	White <i>et al</i> 1983	OV	
	Blackburn et Cartwright 1987	OV	•
	Sorensen <i>et al</i> 1992	BL	•
	Cacho <i>et al</i> 1995	OV	•
	Bosman <i>et al</i> 1997	CA _V	•
	Donnelly <i>et al</i> 1997 ²	OV	
	Tess et Kolstad 2000	BA	•
	Romera <i>et al</i> 2004	BA	•
	Schils <i>et al</i> 2007	BL	
	Beukes <i>et al</i> 2008	BL	•
	Chardon 2008	BL	
	Jouven et Baumont 2008	BA	
	Pérochon <i>et al</i> 2009	BA	•
	Vayssières <i>et al</i> 2009	BL	
	Villalba <i>et al</i> 2010	BA	•
	Puillet <i>et al</i> 2010	CA _L	•

¹ : SP : système de production ; BA : bovins allaitants ; BL : bovins laitiers ; CA_L : caprins laitiers ; CA_V : caprins viande ; OV : ovins allaitants ; • : indique que le modèle est individu-centré ; ² : le modèle est classé en système ovins mais peut être paramétré pour des bovins.

l'animal met l'accent sur l'animal en tant qu'unité de vente ou unité générant des produits de vente. La moitié des modèles n'ont pas été validés et aucun d'entre eux n'a donné lieu au développement d'interface utilisateur ni à la commercialisation d'outils d'aide à la décision (tableau 2).

2.2 / L'animal, un ensemble de variables liées à la production potentielle et aux besoins alimentaires

Dans environ un quart des modèles étudiés (9 sur 35, tableau 1), l'animal est représenté comme une entité caractérisée par un potentiel de production, laitier ou de croissance, en plus d'être une entité qui vieillit et qui change de stade physiologique. Le potentiel de production correspond à un maximum physiologique dans des conditions où la disponibilité en nutriments est non limitante et où il n'y a pas de problème sanitaire.

La majorité des modèles simulent la production potentielle de façon dynamique (7 modèles sur 9) sur la base d'équations développées antérieurement. Par exemple, Marsh *et al* (1987) utilisent le modèle de lactation de Wood (1967) et Rotz *et al* (2005) utilisent le modèle de composition corporelle de Williams et Jenkins (1998). Seuls les modèles d'Upton (1993) et Guimaraes *et al* (2009) reposent sur des productions statiques (kg de lait par jour ou par lactation). La modélisation conjointe de la production potentielle et des variables de reproduction permet d'intégrer les interactions entre fonctions biologiques et plus particulièrement les effets de la production laitière sur les réponses de reproduction. Le modèle d'Oltenacu *et al* (1980) a été modifié pour introduire un effet du niveau de production sur la fertilité des femelles (Oltenacu *et al* 1981). Chaque femelle est décrite par des variables de reproduction et par une courbe de production laitière potentielle. L'entrée en gestation dépend de la durée de l'aneustrus post-partum qui est conditionné par le niveau de production laitière. Le modèle permet ainsi évaluer les effets de la conduite de la reproduction et des politiques de réforme, basées sur des critères reproductifs et laitiers, sur les résultats du troupeau. Ce type de représentation est également adopté dans les modèles de Marsh *et al* (1987), Congleton (1984) et Dijkhuizen *et al* (1986). Le modèle d'Ezanno (2005) s'écarte de la production potentielle pour se diriger vers une représentation de la production permise par les ressources. Les femelles sont réparties en classes d'âges, de stades physiologiques et de notes d'état corporel. Les transitions entre classes dépendent en partie

Tableau 2. Objectifs, validation et éventuels développement des modèles de fonctionnement de troupeau du point de vue de l'interfaçage pour des utilisateurs et de la transformation en outil d'aide à la décision (OAD).

Auteurs	Objectifs	Validation	Nom	Contexte, finalité de développement
Sanders et Cartwright 1979	Performances de différents génotypes dans différents environnements	•	TAMU Beef	Modèle intégré dans un OAD (SHEEPO, McPhee 1996)
Oltenu et al 1980	Effets de la conduite de la reproduction sur les performances du troupeau	•		
White et al 1983	Effet du chargement et de la date d'agnelage sur les performances du troupeau	•		
Congleton 1984	Effets de différentes stratégies de conduite sur les performances du troupeau	•		
Dijkhuizen et al 1986	Effets de la gestion des réformes et de la reproduction sur les performances du troupeau	•		
Blackburn et Cartwright 1987	Performances de différents génotypes dans différents environnements	•	TAMU Sheep	Modèle utilisé dans un grand nombre de contextes mais toujours de recherche (pas de développement d'interface)
Johnson et Notter 1987	Effets de l'œstrus post-partum et du taux de conception sur les performances du troupeau pour plusieurs génotypes	•		
Marsh et al 1987	Effets de 4 stratégies de réforme, du taux de détection des œstrus et du taux de conception sur les résultats du troupeau	•	DairyORACLE	Modèle proposé comme OAD (source : http://www.dairyoracle.com/labpilot/iphome.asp)
Azzam et al 1990	Effets de la date de début de mise à la reproduction et de la durée sur les performances du troupeau			
Denham et al 1991	Effets du taux de conception et de la durée de la reproduction sur les performances du troupeau	•		
Sorensen et al 1992	Effets de la stratégie d'alimentation, de réforme et de distribution des vèlages sur les performances du troupeau	•	SimHERD	Modèle proposé comme OAD (source : http://www.simherd.com/index.php?option=com_content&view=article&id=91&Itemid=34&lang=en)
Upton 1993	Relation entre structure du troupeau et production annuelle			
Cacho et al 1995	Chargement permis par différentes stratégies de gestion des parcelles de pâturage et effet du niveau de chargement sur les performances du troupeau	•		
Bosman et al 1997	Effets de l'alimentation sur les performances du troupeau	•	PC Flock	Modèle commercialisé comme OAD (source : http://www.grazplan.csiro.au/)
Freer et al 1997	Effets des stratégies de pâturage sur les performances du troupeau	•	GRAZPLAN	
Pleasants 1997	Effets de la date de début de mise à la reproduction sur les performances du troupeau			
Schmitz 1997	Relations entre la structure du troupeau, la conduite du renouvellement et la production du troupeau	•		
Benoit 1998	Effets de la fertilité et du choix des périodes de lutte sur les performances du troupeau			
Lesnoff 1999	Effets de la fertilité et de la prolificité sur la démographie du troupeau	•		Modèle interfacé utilisateur et disponible en ligne (source : http://www.ars.usda.gov/main/docs.htm?docid=8519)
Rotz et al 1999	Prédiction des besoins, des performances et des effluents d'un troupeau dans une exploitation	•	IFSM	

Tess et Kolstad 2000	Performances de différents génotypes dans différents environnements et pour différentes stratégies de croisement génétique	•		
Cournut et Dedieu 2004	Effets de la gestion de la reproduction et du renouvellement sur les performances du troupeau	•	TUTOVIN	
Romera <i>et al</i> 2004	Effets de différentes stratégies fourragères sur les performances du troupeau	•	CCFARM	Modèle intégré dans un OAD (PCRank; source : http://animalscience.ucdavis.edu/ex-tension/Software/Pcranch/)
Shalloo <i>et al</i> 2004	Sensibilité du profit de l'exploitation agricole aux variations de paramètres de l'atelier laitier	•	MoorePark Dairy System Model	
Ezanno 2005	Effets de différentes stratégies de supplémentation sur la démographie du troupeau	•		
Rotz <i>et al</i> 2005	Prédiction des besoins, des performances et des effluents d'un troupeau dans une exploitation	•	IFSM	Modèle interfacé utilisateur et disponible en ligne (source : http://www.ars.usda.gov/main/docs.htm?docid=8519)
Schils <i>et al</i> 2007	Evaluation du fonctionnement de l'exploitation agricole et des flux de matières	•	DairyWISE	
Beukes <i>et al</i> 2008	Evaluation du fonctionnement de l'exploitation agricole et des flux de matières	•	WFM	
Chardon 2008	Evaluation du fonctionnement de l'exploitation agricole et des flux de matières	•	MELODIE	
Jouven et Baumont 2008	Effets de différentes stratégies de gestion du pâturage sur la production de viande et la biodiversité des prairies	•	SEBIEN	
Guimaraes <i>et al</i> 2009	Effets du nombre de périodes de reproduction sur les performances du troupeau			
Pérochon <i>et al</i> 2009	Effets des stratégies de reproduction sur les performances du troupeau	•	SIMBALL	
Vayssières <i>et al</i> 2009	Evaluation du fonctionnement de l'exploitation agricole et des flux de matières	•	GAMEDE	
Puillet <i>et al</i> 2010	Effets de différentes stratégies de gestion d'alimentation et de reproduction sur les performances du troupeau	•	SIGHMA	
Villalba <i>et al</i> 2010	Effets de différentes stratégies de gestion d'alimentation et de reproduction sur les performances du troupeau	•	NODRIZA	Modèle interfacé et disponible sur demande (source : http://www.nodriza-oss.es/)

de la note d'état. Cette variable permet de faire le lien entre les effets de la nutrition et les réponses de reproduction. Les stratégies de complémentation du troupeau génèrent des proportions variables d'individus dans les différentes classes de note d'état. Ces différentes proportions d'individus ont un impact sur la dynamique des effectifs et les résultats de reproduction. Ainsi, ce modèle permet d'étudier indirectement les effets de l'alimentation sur les performances du troupeau. Cependant, une telle approche demande un jeu de données conséquent qui nécessite un suivi pluriannuel des variations de notes

d'états des animaux pour calculer les probabilités de transition entre classes.

Une autre dimension liée à la modélisation de la production potentielle est l'intégration des besoins alimentaires associés et ainsi la possibilité de calculer les coûts de production. Les équations de prédiction produites pour les systèmes de rationnement des ruminants permettent de simuler l'évolution temporelle des besoins des animaux et la consommation d'aliments. Cette représentation suppose que les ressources sont non limitantes et que l'animal exprime son potentiel de production. La

simulation de la consommation d'aliments et de la production est centrale dans les modèles à l'échelle de l'exploitation agricole (Rotz *et al* 1999, 2005, Shalloo *et al* 2004) qui s'intéressent aux flux de matières entre les différents ateliers de production.

Les modèles qui simulent la production potentielle et les besoins alimentaires associés sont majoritairement utilisés pour les systèmes laitiers (6 modèles sur 9, tableau 1 ; par exemple Shalloo *et al* 2004 en bovins ou Guimaraes *et al* 2009 en caprins), principalement bovins (5 sur 9, tableau 1). Dans ce type de

système, la productivité numérique du troupeau n'est pas suffisante pour décrire les performances. La production potentielle des animaux et la dynamique des effectifs sont nécessaires pour simuler la production globale du troupeau et les ventes de produits (kilogrammes de viande et litres de lait). Les coûts de production, en particulier alimentaires, sont simulés à partir des besoins associés à la production potentielle. Ces modèles permettent ainsi d'évaluer l'effet des pratiques de reproduction et de renouvellement sur les coûts de production.

La majorité des modèles ont été validés (6 sur 9). Il faut cependant noter que la validation est traitée de façon très variable dans les articles. Elle peut faire l'objet d'une ligne dans l'article présentant le modèle (Dijkhuizen *et al* 1986) comme faire l'objet d'une section complète avec une explicitation des critères de validation (Shalloo *et al* 2004) ou de la mise en place d'expérimentations dédiées (Beukes *et al* 2008). Cette diversité des procédures de validation n'est pas spécifique aux travaux de modélisation du troupeau (Rykiel 1996). La dimension économique des sorties permise par la prise en compte de la production potentielle et des besoins alimentaires est certainement à l'origine du développement d'interface conviviale pour trois de ces modèles. Le modèle de Marsh *et al* 1987 est commercialisé (DairyOracle, tableau 2) et les modèles de Rotz *et al* (1999, 2005) sont intégrés dans l'outil IFSM (*Integrated Farm Systems Model*) qui est accessible en ligne et téléchargeable. Cependant, nous n'avons pas trouvé de document faisant le point sur le profil et les motivations des personnes ayant téléchargé ou acheté ces modèles.

2.3 / L'animal, un ensemble de variables de réponse à l'alimentation

Dans la moitié des modèles environ (17 sur 35), l'animal est représenté comme une entité qui répond à l'alimentation et qui exprime plus ou moins son potentiel de production (tableau 1). Les réponses à l'alimentation sont basées sur une simplification du fonctionnement biologique de l'animal, à l'exception du modèle de Beukes *et al* (2008). Ce modèle d'exploitation laitière herbagère simule le fonctionnement métabolique de la vache laitière en s'appuyant sur une adaptation proposée par Palliser *et al* (2001) du modèle Molly (Baldwin *et al* 1987). Un grand nombre de compartiments anatomiques de la vache sont représentés mais le modèle ne simule qu'une seule année de fonctionnement de l'exploitation et donc un seul cycle de production des animaux.

Dans le reste des modèles, le fonctionnement biologique de l'animal est formalisé par l'évolution temporelle du poids vif et de la production laitière. Dans certains modèles, le poids vif est décomposé en tissus maigres et tissus adipeux. Ces modèles ont été développés dans le contexte des systèmes allaitants bovins (Sanders et Cartwright 1979, Tess et Kolstad 2000, Romera *et al* 2004) et ovins (Blackburn et Cartwright 1987, Cacho *et al* 1995, Donnelly *et al* 1997). Dans ce type de production, la composition corporelle des animaux est un aspect important de la performance.

Dans environ la moitié des modèles (9 sur 17), la simulation des réponses du poids vif à l'alimentation est utilisée pour intégrer les interactions entre les fonctions de reproduction et de nutrition. Ces interactions reposent, entre autres, sur le rôle des réserves corporelles. Les réserves corporelles reflètent les contraintes nutritionnelles passées et présentes auquel l'animal a été soumis. Elles ont également un rôle régulateur important par rapport à l'axe reproducteur. Ainsi, différents indicateurs du niveau des réserves corporelles ou de variation du poids vif sont utilisés pour simuler les interactions entre reproduction et nutrition. Par exemple, Bosman *et al* (1997) utilisent le ratio entre le poids vif de l'individu et son poids vif optimal pour corriger la probabilité de mise bas. Tess et Koldstad (2000) utilisent la note d'état corporel pour moduler la longueur de l'œstrus post-partum. Blackburn et Cartwright (1987) combinent un indicateur du niveau des réserves corporelles et un indicateur du changement de ces réserves sur la période précédente pour déterminer la probabilité de conception de l'animal. Le modèle de Pérochon *et al* (2009) intègre les effets de la note d'état et de la date de vêlage sur la durée de l'œstrus post-partum sur la base du modèle développé par Blanc et Agabriel (2008). Ces effets sont introduits de façon empirique grâce à un ensemble de relations statistiques entre les indicateurs relatifs au poids vif et la probabilité de fécondation ou de mise bas.

L'évolution temporelle du poids vif et de la production laitière est associée à des besoins en nutriments. La comparaison des besoins de l'animal à l'offre alimentaire génère un différentiel qui est réparti entre les différentes fonctions physiologiques (entretien, croissance, gestation et lactation) pour déterminer le niveau des réponses biologiques (production laitière et variations de poids vif). Dans les modèles, l'ingestion d'aliments dépend de deux types de facteurs : i) un facteur physique en lien avec la composition des aliments et ii)

un facteur physiologique en lien avec les besoins des animaux. La représentation de ces facteurs est assez variable. Le facteur physique est représenté avec des variables caractéristiques des aliments comme la fibrosité (par exemple, Tess et Kolstad 2000), la disponibilité d'herbe au pâturage (par exemple, Romera *et al* 2004) ou les unités proposées dans les systèmes de rationnement (système des Unités d'Encombrement pour les modèles français de Chardon 2008, Jouven et Baumont 2008, Vayssières *et al* 2009, Puillet *et al* 2010 ; système des *Scandinavian Feed Units* pour Sorensen *et al* 1992). Le facteur physiologique est principalement représenté par le potentiel de production de l'animal (format et production laitière). A peine 30% des modèles intègrent un contrôle de l'ingestion par l'état corporel (White *et al* 1983, Blackburn et Cartwright 1987, Donnelly *et al* 1997, Tess et Kolstad 2000, Beukes *et al* 2008). Aucun des modèles ne prend en compte l'acquisition des ressources par l'animal et l'éventuelle variabilité dans les comportements alimentaires individuels.

Le principal nutriment considéré est l'énergie, avec 10 modèles basés sur l'énergie métabolisable et 7 sur l'énergie nette. Certains modèles intègrent également l'alimentation protéique des animaux (7 modèles sur 17). Dans les modèles développés pour les troupeaux bovins laitiers, les apports protéiques sont un facteur limitant de la production laitière (Chardon 2008, Vayssières *et al* 2009). Dans les modèles développés pour les troupeaux allaitants ovins (Blackburn et Cartwright 1987, Donnelly *et al* 1997) ou bovins (Tess et Kolstad 2000, Romera *et al* 2004), les apports protéiques sont nécessaires pour la croissance des tissus maigres.

La répartition du différentiel entre besoin et disponibilité en nutriments entre les fonctions implique un système de règles de priorité. Ces règles sont explicitées de façon variable dans les modèles. Le plus souvent, le différentiel entre besoins et disponibilité en nutriments est réparti entre la production laitière et le poids vif (White *et al* 1983, Sorensen 1992, Schils *et al* 2007, Chardon 2008, Jouven et Baumont 2008, Pérochon *et al* 2009, Vayssières *et al* 2009) voire entre production laitière, tissus maigres et tissus gras (Cacho *et al* 1995, Donnelly *et al* 1997, Romera *et al* 2004). Bien que l'allocation des nutriments soit un processus central dans l'élaboration des réponses à l'alimentation, peu d'auteurs se sont concentrés sur la représentation du pilotage de cette allocation. Sanders et Cartwright (1979) puis Blackburn et Cartwright (1987) sont les premiers à utiliser une représentation des priorités entre fonctions

basée sur un réseau de compartiments interconnectés dont la taille et la position relative déterminent le remplissage et donc le niveau de priorité par rapport au captage de nutriments. Tess et Kolstad (2000) sont les premiers à mentionner explicitement les régulations d'homéorhèse comme pilotes de cette partition. Les régulations d'homéorhèse représentent l'évolution des priorités d'un animal au cours de la succession des cycles de reproduction (Bauman et Currie 1980). Tess et Kolstad (2000) synthétisent les effets des régulations par quatre règles statiques d'affectation de l'énergie aux fonctions. Plus récemment, dans le modèle de chèvre laitière de Puillet *et al* (2008), intégré dans un modèle troupeau (Puillet *et al* 2010), une représentation simplifiée mais explicite et dynamique des régulations à l'origine des priorités entre fonctions est proposée. Cependant, cette représentation ne prend pas en compte une éventuelle variabilité génétique des animaux par rapport aux règles de priorité entre fonctions.

La simulation des réponses de l'animal à l'alimentation dans les modèles de fonctionnement de troupeau a permis d'élargir le champ des scénarios de conduite testés, notamment par rapport aux pratiques d'alimentation. Les modèles ont principalement testés les effets :

- de la gestion du pâturage sur les performances productives (White *et al* 1983, Cacho *et al* 1995, Romera *et al* 2004, Jouven et Baumont 2008) ;
- de l'environnement sur l'expression d'un génotype (Sanders et Cartwright 1979, Blackburn et Cartwright 1987, Tess et Kolstad 2000) ;
- des stratégies d'alimentation (Sorensen *et al* 1992, Bosman *et al* 1997, Vayssières *et al* 2009) ;
- des stratégies de répartition des vèlages (Pérochon *et al* 2009) ;
- des combinaisons de stratégies d'alimentation et de reproduction (Puillet *et al* 2010, Villalba *et al* 2010).

Les modèles simulant les réponses de l'animal à l'alimentation couvrent un large contexte de systèmes de production (6 en bovins allaitants, 5 en bovins laitiers, 2 en caprins et 4 en ovins). Ils simulent une gamme plus large de scénarios de conduite que les modèles dans lesquels l'animal est représenté par des variables de reproduction ou de production potentielle. Cette plus large gamme de scénarios simulés explique sûrement le développement plus important d'interfaces conviviales pour ces modèles (5 modèles sur 17, tableau 2 ; exemple du logiciel NODRIZA développé sur la base du modèle de Villalba *et al* 2010)

voire même leur commercialisation (exemple du logiciel GRAZPLAN développé sur la base du modèle de Donnelly *et al* 1997).

Les modèles sont fréquemment validés au niveau des sous-modèles constitutifs. Un certain nombre d'auteurs (Sorensen *et al* 1992, Chardon 2008, Jouven et Baumont 2008, Vayssières *et al* 2009) soulignent la difficulté de valider de tels modèles, la principale contrainte étant la disponibilité de jeux de données très complets et sur un pas de temps pluriannuel. Une validation rigoureuse s'appuie sur une quantification statistique de l'écart entre ce qui est prédit par le modèle et ce qui est mesuré en réalité (par exemple, utilisation de la rmse, «*root mean square error*»). En l'absence des jeux de données adaptés, les auteurs s'appuient sur d'autres techniques de validation comme la consultation d'un comité d'experts (Chardon 2008, Jouven et Baumont 2008, Vayssières *et al* 2009).

2.4 / Limites des représentations de la composante animale pour l'étude de la variabilité individuelle

L'analyse des modèles de fonctionnement du troupeau montre un gradient de représentation de la composante animale. Ce gradient est lié aux objectifs des modèles et des questions spécifiques qu'ils traitent. La représentation de l'animal par des variables liées à la reproduction limite fortement la représentation de la variabilité individuelle. La variabilité génétique est intégrée de façon partielle (variables de reproduction) et la variabilité liée aux réponses à l'alimentation est absente. La représentation de l'animal par des variables liées à la production potentielle conduit à une représentation plus complète de la variabilité génétique (variables de production et reproduction) mais la variabilité liée aux réponses de la production à l'alimentation est toujours absente. De plus, ces modèles abordent la variabilité d'un point de vue statistique et n'intègrent pas le processus d'élaboration des réponses. La variabilité finale des réponses résulte de la combinaison de distributions de probabilité d'autres variables, gérées en entrée de simulation. Ces limites sont en partie surmontées dans les modèles où les réponses à l'alimentation sont formalisées. Ces modèles intègrent une représentation de l'animal basée sur les processus mais certaines faiblesses demeurent : *i*) l'absence de prise en compte des interactions entre nutriments, plus particulièrement énergie et protéines ; *ii*) la représentation partielle des régulations physiologiques qui pilotent l'allocation de nutriments, les interactions entre les

fonctions de nutrition et de reproduction et le contrôle de l'ingestion et *iii*) la non prise en compte des mécanismes d'acquisition des ressources.

3 / Représentation de la composante décisionnelle

3.1 / Modèles intégrant pratiques de reproduction et de renouvellement

Environ 40% des modèles intègrent les pratiques de reproduction et de renouvellement. Parmi cet ensemble de modèles, les niveaux d'information mobilisés pour représenter les pratiques sont assez variables.

a) Des paramètres définis à l'échelle du troupeau

La moitié des modèles qui intègrent les pratiques de reproduction et de renouvellement formalisent la conduite à partir d'une batterie de paramètres d'entrée définis à l'échelle du troupeau (tableau 3). Au minimum, les pratiques de reproduction sont modélisées sous la forme d'une période et d'une durée (Azzam *et al* 1990, Denham *et al* 1991). Ces deux paramètres définissent une période de temps pendant laquelle les animaux peuvent changer de stade physiologique et initier une gestation. Cette représentation peut être enrichie par l'ajout d'autres paramètres représentant de façon indirecte certaines pratiques comme la détection des chaleurs (Azzam *et al* 1990). Les pratiques de renouvellement sont définies par un taux d'entrée et de sortie d'animaux couplés à la taille du troupeau pour déterminer le nombre d'animaux qui intègrent et sortent du troupeau. Les modèles basés sur des classes d'âge détaillent les pratiques de réforme en déclinant le taux par classe d'âge (Lesnoff 1999, Ezanno 2005) ou en utilisant un processus markovien pour simuler différentes stratégies de réforme et déterminer les probabilités de transition entre classes d'âge (Azzam *et al* 1990).

b) Des interactions entre les paramètres définis à l'échelle du troupeau et les informations produites par les animaux

Le tiers des modèles intégrant les pratiques de reproduction et de renouvellement simulent la conduite sur la base de paramètres d'entrée définis à l'échelle du troupeau ainsi que sur la base d'informations produites par les animaux (tableau 3). Cette représentation domine dans les modèles développés pour les élevages bovins laitiers. Du point de vue de la reproduction, la date d'insémination d'une vache après la mise bas est

Tableau 3. Représentation de la composante décisionnelle dans les modèles de fonctionnement du troupeau.

La composante décisionnelle intègre la diversité des effets des pratiques et la diversité des niveaux d'information mobilisés. Les références sont présentées par catégories de pratiques représentées puis par ordre chronologique.

Catégories de pratiques	Référence	SP	Niveaux d'information mobilisés		
			Troupeau	Lot	Individu
Reproduction et renouvellement	Oltenacu <i>et al</i> 1980	BL	•		•
	Congleton 1984	BL	•		•
	Dijkhuizen <i>et al</i> 1986	BL	•		•
	Johnson et Notter 1987	BA	•		•
	Marsh <i>et al</i> 1987	BL	•		•
	Azzam <i>et al</i> 1990	BA	•		
	Denham <i>et al</i> 1991	BA	•		
	Upton 1993	BA	•		
	Pleasants 1997	BA	•		
	Schmitz 1997	BA	•		
	Benoit 1998	OV	•	•	
	Lesnoff 1999	OV	•		
	Cournut et Dedieu 2004	OV	•	•	•
	Ezanno 2005	BA	•		
	Guimaraes <i>et al</i> 2009	CAL	•	•	
Reproduction, renouvellement et alimentation	Sanders et Cartwright 1979	BA	•	•	
	White <i>et al</i> 1983	OV	•	•	
	Blackburn et Cartwright 1987	OV	•	•	•
	Sorensen <i>et al</i> 1992	BL	•	•	•
	Cacho <i>et al</i> 1995	OV	•	•	
	Bosman <i>et al</i> 1997	CAV	•	•	
	Donnelly <i>et al</i> 1997	OV	•	•	
	Rotz <i>et al</i> 1999	BL	•	•	
	Tess et Kolstad 2000	BA	•	•	•
	Romera <i>et al</i> 2004	BA	•	•	•
	Shalloo <i>et al</i> 2004	BL	•	•	
	Rotz <i>et al</i> 2005	BA	•	•	
	Shils <i>et al</i> 2007	BL	•	•	
	Beukes <i>et al</i> 2008	BL	•	•	
	Chardon 2008	BL	•	•	
	Jouven et Baumont 2008	BA	•	•	
	Pérochon <i>et al</i> 2009	BA	•	•	•
	Vayssières <i>et al</i> 2009	BL	•	•	
	Villalba <i>et al</i> 2010	BA	•	•	•
	Puillet <i>et al</i> 2010	CAL	•	•	•

¹ : SP : système de production ; BA : bovins allaitants ; BL : bovins laitiers ; CA_L : caprins laitiers ; CA_V : caprins viande ; OV : ovins allaitants ; • : indique que le modèle mobilise le niveau concerné.

déterminée d'une part par sa date de mise bas et d'autre part par l'intervalle minimum entre la mise bas et l'insémination, paramètre défini en entrée du modèle (Oltenacu *et al* 1980, Marsh *et al* 1987). Ainsi, dans ces modèles, la

mise à la reproduction d'une vache est déterminée par une information mobilisée au niveau individuel, liée à la biologie de la vache, et une information mobilisée au niveau du troupeau, liée au paramétrage de la conduite par l'utilisa-

teur du modèle. Du point de vue du renouvellement, le niveau individuel permet de prendre en compte des critères de sélection des animaux à réformer ou à conserver pour le renouvellement. Pour simuler la réforme d'un animal, les modèles intègrent une combinaison de critères individuels : infertilité, niveau de production laitière, âge (Oltenacu *et al* 1980, Congleton 1984, Dijkhuizen *et al* 1986). Pour simuler la sélection d'une femelle pour le renouvellement, les modèles intègrent principalement un critère laitier (Dijkhuizen *et al* 1986) et plus rarement un critère d'âge (Congleton 1984).

c) Des pratiques qui s'appuient sur le lot d'animaux

Dans le contexte des élevages de petits ruminants, plusieurs périodes de mises bas peuvent être organisées dans l'année, ce qui implique de constituer des lots de femelles. Trois modèles intègrent ce niveau d'organisation pour représenter les pratiques de reproduction et de renouvellement (Benoit 1998, Cournut et Dedieu 2004 : ovins allaitants ; Guimaraes *et al* 2009 : caprins laitiers ; tableau 3). Chaque lot correspond à une période de lutte et la gestion du renouvellement est déclinée pour chaque lot. La gestion des différents lots peut donner lieu à une formalisation simplifiée, sur la base de taux de fertilité et de renouvellement différentiels (Benoit 1998, Guimaraes *et al* 2009). La gestion des différents lots peut faire l'objet d'une modélisation explicite des événements de conduite (lutte, diagnostic de gestation, tarissement, réforme dans le modèle de Cournut et Dedieu 2004). La représentation de différentes périodes de reproduction s'appuie également sur la représentation des échecs de reproduction et de leur gestion. Les femelles échouant à la lutte sont transférées dans un autre lot pour avoir une opportunité supplémentaire de se reproduire. Ce type de flux d'animaux entre session de lutte a été initialement conceptualisé pour les systèmes ovins allaitants par Girard et Lasseur (1997). Ces auteurs ont défini la notion de calibre, c'est-à-dire la proportion de femelles susceptibles de changer de lot de lutte. Ce concept a été repris et implémenté par Benoit (1998) qui représente la gestion des échecs de reproduction par un flux de femelles entre lots. La même formalisation de flux de femelles est reprise dans le modèle caprin de Guimaraes *et al* (2009). Le modèle individu-centré de Cournut et Dedieu (2004) approfondit la formalisation de la gestion des échecs de reproduction puisque la décision de changement de lot est prise sur la base d'indicateurs individuels du statut physiologique, déterminés lors du diagnostic de gestation.

3.2 / Modèles articulant pratiques de reproduction, de renouvellement, d'alimentation

La modélisation de l'ensemble des catégories de pratiques se retrouve dans 60% des modèles étudiés. L'intégration de l'alimentation s'appuie sur l'allotement car les apports alimentaires sont raisonnés à l'échelle de groupes d'animaux (tableau 3). Dans la majorité des modèles, les lots sont constitués pour l'alimentation mais ils ne sont pas maintenus dans le temps pour représenter les autres catégories de pratiques. Les pratiques de reproduction et de renouvellement sont raisonnées au niveau troupeau, voire intègrent des informations individuelles dans 7 modèles sur 20 (tableau 3).

Un premier ensemble de modèles représente les lots d'animaux sur la base d'une combinaison de critères (âge, sexe et/ou stade physiologique). Ces lots permettent soit d'attribuer différents types et quantités d'aliments (Sanders et Cartwright 1979, Blackburn et Cartwright 1987, Sorensen *et al* 1992, Bosman *et al* 1997), soit de déterminer différents postes de consommation des ressources de l'exploitation et d'achat à l'extérieur (Rotz *et al* 1999, 2005, Shalloo *et al* 2004, Schils *et al* 2007, Chardon 2008, Vayssières *et al* 2009). Par exemple, dans le modèle de Rotz *et al* (1999), les différentes rations sont déterminées de façon hiérarchique. La ration des vaches en lactation est calculée en premier avec une maximisation de la consommation d'herbe. Ensuite, en fonction de la disponibilité d'herbe, la ration des vaches tarées est calculée. Finalement, la ration des génisses est calculée sur la base d'un programme fixe. Bien que ces modèles simulent des rations différentes pour les lots d'animaux, il n'est pas mentionné comment les transitions entre rations sont gérées au cours du cycle de vie des animaux. Un deuxième ensemble de modèles représente les lots d'animaux en fonction de la conduite du pâturage. Le lot correspond à un type de femelles (génisses, vaches tarées, vaches en lactation) qui exploite un type de ressource (White *et al* 1983, Cacho *et al* 1995, Romera *et al* 2004, Jouven et Baumont 2008). Le lot permet alors d'identifier un type de prélèvement animal et de simuler l'effet de ce prélèvement sur une ressource donnée. Les transitions entre rations correspondent ici aux changements de parcelles, déclenchés par le niveau de biomasse.

Dans quelques modèles, le lot est le support des pratiques de reproduction, de renouvellement et d'alimentation (Pérochon *et al* 2009, Puillet *et al* 2010). L'allotement des animaux traduit

le projet de l'éleveur. Le modèle de Pérochon *et al* (2009) a étendu les développements conceptuels de Cournut et Dedieu (2004) en intégrant l'alimentation des lots. Le modèle de Puillet *et al* (2010) représente explicitement la stratégie d'alimentation qui correspond à un animal pilote, qui sert de référence pour établir le niveau des apports énergétique de la ration, et à un plan d'alimentation, qui définit les dates de changement de ration. Cette représentation s'appuie sur les travaux de Guérin et Bellon (1990) sur les systèmes pastoraux. Ces derniers ont défini la stratégie d'alimentation comme un enchaînement de séquences alimentaires ; chaque séquence est bornée dans le temps et correspond à une homogénéité entre les ressources alimentaires mobilisées et le type de demande animale.

3.3 / Limites des représentations de la composante décisionnelle pour l'étude de la variabilité individuelle

L'analyse des modèles montre un gradient de représentation des pratiques ainsi que des niveaux d'information mobilisés. Les modèles centrés sur les pratiques de reproduction et de renouvellement concernent principalement les systèmes allaitants. Ils n'étudient que les principaux facteurs de conduite qui ont un impact sur la productivité numérique. Ils ne permettent pas d'étudier la variabilité générée par les pratiques d'alimentation, alors que celle-ci peut s'avérer importante. Les modèles qui intègrent l'ensemble des pratiques de conduite concernent une large gamme de systèmes de production. Ils intègrent la diversité des effets des pratiques sur les animaux. Cependant, ces modèles présentent deux types de limites par rapport à la représentation de la variabilité individuelle.

La première limite est que dans certains modèles, le lot n'est utilisé que pour représenter l'alimentation. Le lot est pourtant le niveau d'organisation où se mettent en œuvre les relations logiques et fonctionnelles entre les différentes pratiques (Landais 1987 citant les travaux de Cristofini *et al* 1978). Les limites dans la formalisation du lot sont à relier aux limites des modèles par rapport à la prise en compte du projet d'élevage dans l'élaboration des pratiques. Comme le soulignent Landais et Deffontaines (1988) « *on connaît les projets par les pratiques, on comprend les pratiques par les projets* » ; les pratiques jouent un rôle central dans la réalisation du projet d'élevage et résultent d'un processus de décision. Comme l'ont montré les travaux des agronomes, le processus de décision met en jeu un projet ainsi qu'une stratégie pour réali-

ser ce projet (e.g. pour les systèmes fourragers Coléno et Duru 2005 ; ou pour les grandes cultures Aubry *et al* 1998). Les travaux que nous avons passés en revue indiquent que la prise en compte du processus d'élaboration des décisions, tant au niveau conceptuel qu'informatique, reste assez limitée dans les modèles de troupeau. La majorité des modèles proposent une vision descendante des pratiques sous forme d'un jeu de paramètres agissant sur les animaux. La conduite est alors formalisée en spécifiant les valeurs des paramètres.

Bien que certains auteurs aient centré leurs efforts sur la représentation du lien entre projet et pratiques (Pérochon *et al* 2009, Puillet *et al* 2010), ils n'envisagent pas la composante adaptative de la décision, ce qui constitue une deuxième limite pour la représentation de la variabilité individuelle. Ils modélisent une prise d'information au niveau des animaux, nécessaire pour l'exécution des pratiques, mais ils n'intègrent pas de modification des pratiques en fonction de ces informations ou d'autres éléments de l'environnement. Ce n'est que très récemment que des approches développées à l'échelle de l'exploitation agricole dépassent cette limite (Chardon 2008, Vayssières *et al* 2009). Dans ces modèles, la conduite du troupeau est très simplifiée mais la gestion à l'échelle de l'exploitation prend en compte les aléas climatiques et les ajustements du pilotage opérationnel en cours de campagne. Ainsi, une dimension intéressante de ces modèles par rapport au troupeau est la simulation d'une offre alimentaire dynamique (en quantité et qualité) qui intègre les variations de l'environnement (calendrier de pâturage pour Chardon 2008 ; ration en fonction des stocks de matières sur l'exploitation pour Vayssières *et al* 2009).

4 / Discussion

4.1 / Limites des modèles existants

L'analyse des modèles de fonctionnement du troupeau met en évidence plusieurs limites pour la représentation des composantes animale et décisionnelle de la variabilité individuelle. Du point de vue de la composante animale, les modèles intègrent une représentation partielle de la variabilité du fait de :

- la représentation d'une seule réponse biologique ;
- l'absence des processus d'élaboration des réponses à l'alimentation ;
- la formalisation partielle de l'animal comme un organisme régulé, géant l'allocation d'énergie entre les

fonctions, les interactions entre nutrition et reproduction et le contrôle de l'ingestion.

Du point de vue de la composante décisionnelle, la représentation de la variabilité est également partielle du fait :

- d'une approche par classe d'individus limitant la prise en compte des informations individuelles pour la mise en œuvre de la conduite ;

- de la représentation d'un seul type de pratiques alors que les pratiques d'alimentation, de reproduction et de renouvellement sont en soi un système de pratiques raisonnées de façon coordonnée à l'échelle du lot et du troupeau ;

- de l'absence de formalisation du lien entre projet d'élevage et pratiques, se traduisant dans la plupart des cas par l'absence de lots et d'ajustement des pratiques en fonction des informations produites aux différents niveaux d'organisation du troupeau.

4.2 / Cahier des charges

Les choix de représentation faits dans les différents modèles sont contingents des objectifs auxquels ils répondent. Ainsi, l'examen critique de leurs limites pour l'étude de la variabilité n'est pas une fin en soi mais un moyen de poser les bases du cahier des charges d'un modèle répondant à cet objectif. Au terme de ce bilan, il apparaît ainsi qu'un modèle pour l'étude de la variabilité individuelle doit comporter deux caractéristiques essentielles. La première concerne la composante animale de la variabilité individuelle. Celle-ci doit s'appuyer sur une représentation individu-centrée. Cet aspect a déjà été souligné par Agabriel et Ingrand (2004) et Tichit *et al* (2004). Le niveau individuel est nécessaire pour représenter les informations liées à l'animal qui conditionnent la prise de décision, notamment par rapport à la gestion des réformes ou de l'infertilité. Le niveau individuel est également nécessaire pour représenter les processus à l'origine des réponses de l'animal à son environnement. Ce niveau est nécessaire pour à la fois intégrer le rôle du potentiel génétique, des régulations biologiques et de la variabilité de ces éléments entre individus. Nous ne plaçons pas ici pour une représentation mécaniste de l'intégralité de la biologie de l'animal. Nous plaçons plutôt pour une représentation qui, tout en restant suffisamment stylisée, aborde l'animal comme «une entité biologique avec son propre agenda» (Friggens et Newbold 2007). La deuxième caractéristique concerne la composante décisionnelle qui doit expliciter les lots d'animaux. D'une part, ils représentent le support du raisonnement technique

de l'éleveur et ils permettent d'articuler de façon cohérente les opérations techniques d'alimentation, de reproduction et de renouvellement dans un système de pratiques finalisé par un projet de production. D'autre part, le lot est un niveau d'information essentiel pour l'éleveur et pour l'ajustement de la conduite.

4.3 / Implications scientifiques

La mise en œuvre du cahier des charges d'un modèle du fonctionnement du troupeau pour l'étude de la variabilité individuelle pointe des besoins de connaissances analytiques sur les mécanismes biologiques sources de variabilité. Peu de données sont actuellement disponibles sur la variabilité des réponses de la production à des facteurs de conduite, alors qu'elles sont nécessaires pour approfondir la représentation des lois de réponses existantes. La variabilité individuelle a fait l'objet de très peu d'expérimentations spécifiques, probablement du fait de l'alourdissement des dispositifs expérimentaux que sa prise en compte implique (nombre d'animaux, répétitions dans le temps). La variabilité individuelle est également peu prise en compte dans l'interprétation des résultats d'expérimentations. Il serait d'ailleurs intéressant de revaloriser les données existantes en considérant l'animal non plus comme un effet aléatoire mais comme un effet fixe. Se concentrer sur la variabilité individuelle peut être un changement de posture efficace pour comprendre des phénomènes biologiques sous-jacents. Les travaux de Desnoyers *et al* (2008) sur l'acidose ont par exemple montré qu'il était possible d'expliquer en partie l'apparition ou l'absence d'épisodes d'acidose grâce à l'observation des comportements alimentaires individuels extrêmes. Un autre aspect du besoin de connaissances analytiques réside dans la compréhension de certains mécanismes d'interactions biologiques et de leur déterminisme, encore peu connus et se déroulant à des niveaux biologiques fins (par exemple, interactions entre la nutrition et la fonction ovarienne). Les approches «omiques» ou le phénotypage à haut débit sont des voies d'investigation prometteuses pour isoler le déterminisme génétique des variations liées à l'environnement mais elles impliquent des niveaux biologiques très fins qui seront difficiles à articuler avec le niveau troupeau. Les collaborations interdisciplinaires nous paraissent indispensables pour surmonter ces difficultés. Elles permettront de filtrer les connaissances produites à des échelles très fines pour les capitaliser à l'échelle du système d'élevage.

L'émergence de nouvelles pratiques dans les élevages constitue une opportu-

rité supplémentaire pour approfondir le champ des connaissances autour de la variabilité individuelle. La conduite en lactation longue ou la monotraite sont des exemples de pratiques à même de moduler la variabilité dans le troupeau. De plus, produire des connaissances appliquées sur le pilotage de la variabilité individuelle impliquera nécessairement des relations entre de multiples critères de performances et facteurs de conduite. Le recours aux méthodes d'analyse développées pour l'évaluation multicritères des systèmes de production apparaît incontournable pour pouvoir évaluer les compromis à faire autour du pilotage de la variabilité.

La poursuite des efforts de recherche autour de la variabilité individuelle est d'autant plus importante que les dynamiques en cours dans le secteur de l'élevage sont susceptibles d'accroître la variabilité individuelle au sein des troupeaux. Ces dynamiques peuvent être variées, depuis la recherche d'autonomie alimentaire et d'exploitation de ressources variables dans le temps (tant au niveau de la qualité que de la quantité) vers l'agrandissement des structures et la simplification du travail. Ces dynamiques sont susceptibles d'augmenter le niveau d'incertitude de l'environnement des élevages (aléas liés au climat, aux marchés des matières premières...). Ainsi, les capacités d'adaptation du troupeau seront plus fortement sollicitées et le besoin de résilience du système sera accru. La variabilité individuelle est une source potentielle de résilience mais il manque encore des connaissances sur la quantification des niveaux de variabilité individuelle les mieux à même d'accroître la résilience du troupeau face à des perturbations exogènes. Il manque également des connaissances à destination des éleveurs sur le pilotage de la variabilité. Des pistes existent à l'heure actuelle (Lee *et al* 2009) : *i*) segmenter le troupeau et conduire chaque segment en fonction de son potentiel de réponse aux pratiques d'alimentation et de reproduction (par exemple, cibler la pratique du *flushing* sur les meilleures reproductrices) ; *ii*) allonger les durées de vie productive des femelles les plus efficaces ou encore *iii*) raccourcir les durées de vie des femelles les moins efficaces et mieux profiter du progrès génétique des nouvelles générations. Cependant, ces différentes propositions impliquent des compromis et soulèvent des interrogations : *i*) la segmentation du troupeau implique une multiplication des lots et des contraintes en termes de travail ; *ii*) l'allongement de la durée de vie des femelles les plus efficaces pose la question des conséquences sur les performances de reproduction et *iii*) la réforme des femelles les moins efficaces

pose la question de la détection précoce du potentiel de production, de la gestion des effectifs de renouvellement et de l'amortissement du coût de la phase d'élevage.

Conclusion

Les zootechniciens ont posé les bases conceptuelles du fonctionnement du

troupeau vu comme l'interaction dynamique entre un système décisionnel et un système biotechnique (Gibon *et al* 1999, Dedieu *et al* 2008). Cette représentation conceptuelle est opérationnelle pour aborder la diversité des composantes de la variabilité individuelle et les interactions entre ces composantes. Ainsi, l'enjeu autour de l'étude de la variabilité individuelle n'est pas de remettre en question cette représenta-

tion du troupeau mais d'approfondir la représentation de ses différentes composantes. De plus, la poursuite des efforts de modélisation du fonctionnement du troupeau et le renforcement des collaborations entre différentes disciplines scientifiques nous semblent essentiels pour pouvoir proposer des systèmes de conduite favorisant la résilience des troupeaux dans des contextes caractérisés par une plus grande incertitude.

Références

- Agabriel J., Ingrand S., 2004. Modelling the performance of the beef cow to build a herd functioning simulator. *Anim. Res.*, 53, 347-361.
- Aubry C., Capillon A., Papy F., 1998. Modelling decision-making processes for annual crop management. *Agric. Syst.*, 56, 45-65.
- Azzam S.M., Kinder J.E., Nielsen M.K., 1990. Modelling reproductive management systems for beef cattle. *Agric. Syst.*, 34, 103-122.
- Baldwin R.L., France J., Gill M., 1987. Metabolism of the lactating cow. I. Animal elements of a mechanistic model. *J. Dairy Res.*, 54, 77-105.
- Bauman D.E., Currie W.B., 1980. Partitioning of nutrients during pregnancy and lactation: a review of mechanisms involving homeostasis and homeorhesis. *J. Dairy Sci.*, 63, 1514-1529.
- 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 Prod. Anim.*, 11, 199-209.
- Beukes P.C., Palliser C.C., Macdonald K.A., Lancaster J.A.S., Levy G., Thorrold B.S., Wastney M.E., 2008. Evaluation of a whole-farm model for pasture-based dairy systems. *J. Dairy Sci.*, 91, 2353-2360.
- Blackburn H.D., Cartwright T.C., 1987. Description and validation of the Texas A & M sheep simulation model. *J. Anim. Sci.*, 65, 373-386.
- Blanc F., Agabriel J., 2008. Modelling the reproductive efficiency in a beef cow herd: effect of calving date, bull exposure and body condition at calving on the calving-conception interval and calving distribution. *J. Agric. Sci.*, 146, 143-161.
- Bosman H.G., Ayantunde A.A., Steenstra F.A., Udo H.M.J., 1997. A simulation model to assess productivity of goat production in the tropics. *Agric. Syst.*, 54, 539-576.
- Bourdon R.M., Brinks J.S., 1987. Simulated efficiency of range beef production. I. Growth and milk production. *J. Anim. Sci.*, 65, 943-955.
- Brossard L., Dourmad J.Y., Rivest J., van Milgen J., 2009. Modelling the variation in performance of a population of growing pigs as affected by lysine supply and feeding strategy. *Animal*, 3, 1114-1123.
- Cacho O.J., Finlayson J.D., Bywater A.C., 1995. A simulation model of grazing sheep: II. Whole farm model. *Agric. Syst.*, 48, 27-50.
- Chardon X., 2008. Evaluation environnementale des exploitations laitières par modélisation dynamique de leur fonctionnement et des flux de matière : développement et application du simulateur Mélodie. Thèse de doctorat, AgroParisTech, Paris, France, 281p.
- Coléno F., Duru M., 2005. L'apport de la gestion de production aux sciences agronomiques. Le cas des ressources fourragères. *Nat. Sci. Soc.*, 13, 247-257.
- Congleton W.R., Jr, 1984. Dynamic model for combined simulation of dairy management strategies. *J. Dairy Sci.*, 67, 644-660.
- Cournut S., Dedieu B., 2004. A discrete events simulation of flock dynamics: a management application to three lambing in two years. *Anim. Res.*, 53, 383-403.
- Cristofini B., Deffontaines J.P., Raichon C., DeVerneuil B., 1978. Pratiques d'élevage en Castagniccia. Exploration d'un milieu naturel et social en Corse. *Etudes Rurales*, 71-72.
- Cros M.J., Duru M., Garcia F., Martin-Clouaire R., 2001. Simulating rotational grazing management. *Env. Intl.*, 27, 139-145.
- Dedieu B., Faverdin P., Dourmad J.Y., Gibon A., 2008. Système d'élevage, un concept pour raisonner les transformations de l'élevage. In : Numéro spécial Anniversaire, 20 ans de recherches en productions animales à l'INRA. Charley B., Herpin P., Perez J.M. (Eds). *INRA Prod. Anim.*, 21, 45-58.
- Denham S.C., Larsen R.E., Boucher J., Adams E.L., 1991. Structure and behavior of a deterministic model of reproductive performance in beef cattle. *Agric. Syst.*, 35, 21-36.
- Desnoyers M., Giger-Reverdin S., Duvaux-Ponter C., Lebarbier E., Sauvant D., 2008. Modélisation des épisodes d'acidose sub-clinique et du comportement alimentaire associé : application à la chèvre laitière. *Renc. Rech. Rum.*, 15, 339-342.
- Dijkhuizen A.A., Stelwagen J., Renkema J.A., 1986. A stochastic model for the simulation of management decisions in dairy herds, with special reference to production, reproduction, culling and income. *Prev. Vet. Med.*, 4, 273-289.
- Donnelly J.R., Moore A.D., Freer M., 1997. GRAZPLAN: decision support system for Australian Grazing Enterprises. 1. Overview of the GRAZPLAN project, and a description of the MetAccess and LambAlive DSS. *Agric. Syst.*, 54, 57-76.
- Ezanno P., 2005. Dynamics of a tropical cattle herd in a variable environment: a modelling approach in order to identify the target period and animals on which concentrating management efforts to improve productivity. *Ecol. Model.*, 188, 470-482.
- Friggens N.C., Newbold J.R., 2007. Towards a biological basis for predicting nutrient partitioning: the dairy cow as an example. *Animal*, 1, 87-97.
- Gibon A., 1994. Landscape preservation objectives and the sheep flock management in Mediterranean mountains. Actes of a meeting held within the technical consultation of the FAO-CIHEAM Network on Cooperative Sheep and Goat Research, 19-22 juin 1994, Thessalonique, Grèce, 188-193.
- Gibon A., Sibbald A.R., Flamant J.C., Lhoste P., Revilla R., Rubino R., Sorensen J.T., 1999. Livestock farming systems research in Europe and its potential contribution for managing towards sustainability in livestock farming. *Livest. Prod. Sci.*, 61, 121-137.
- Girard N., Lasseur J., 1997. Stratégies d'élevage et maîtrise de la répartition temporelle de la reproduction. Exemples en élevage ovin en montagne méditerranéenne. *Cah. Agric.*, 6, 115-124.
- Guimaraes V.P., Tedeshi L.O., Rodrigues M.T., 2009. Development of a mathematical model to study the impact of production and management policies on the herd dynamics and profitability of dairy goats. *Agric. Syst.*, 101, 186-196.
- Guérin G., Bellon S., 1990. Analysis of the functions of pastoral areas in forage systems in mediterranean region. *Etudes et Recherches sur les systèmes agaires*, 16, 147-156.
- Ingvartsen K.L., Friggens N.C., 2005. To what extent do variabilities in hormones, metabolites and energy intake explain variability in milk yield? *Dom. Anim. Endocrinol.*, 29, 294-304.
- Johnson M.H., Notter D.R., 1987. Simulation of genetic control of reproduction in beef cows. I. Simulation model. *J. Anim. Sci.*, 65, 68-75.
- Jouven M., Baumont R., 2008. Simulating grassland utilization in beef suckler systems to investigate the trade-offs between production and floristic diversity. *Agric. Syst.*, 96, 260-272.
- Kahn H.E., Spedding C.R.W., 1983. A dynamic model for the simulation of cattle herd production systems: Part 1. General description and the effects of simulation techniques on model results. *Agric. Syst.*, 12, 101-111.
- Knaus W., 2009. Dairy cows trapped between performance demands and adaptability. *J. Sci. Food Agric.*, 89, 1107-1114.
- Kristensen A.R., 1987. Optimal replacement and ranking in dairy cows determined by a

- hierarchic markov process. *Livest. Prod. Sci.*, 16, 131-144.
- Landais E., 1987. Recherches sur les systèmes d'élevage. Questions et perspectives. Document de travail INRA SAD Versailles, France, Décembre 1987, 75p.
- Landais E., Deffontaines J.P., 1988. Les pratiques des agriculteurs. Point de vue sur un courant nouveau de la recherche agronomique. *Et. Rur.*, 109, 125-158.
- Lasseur J., Landais E., 1992. Mieux valoriser l'information contenue dans les carnets d'agnelages pour évaluer des performances et des carrières de reproduction en élevage ovin-viande. *INRA Prod. Anim.*, 5, 43-58.
- Lee G.J., Atkins K.D., Sladek M.A., 2009. Heterogeneity of lifetime reproductive performance, its components and associations with wool production and liveweight of Merino ewes. *Anim. Prod. Sci.*, 49, 624-629.
- Lesnoff M., 1999. Dynamics of a sheep population in a Sahelian area (Ndiagne district in Senegal): a periodic matrix model. *Agric. Syst.*, 61, 207-221.
- Marsh W.E., Dijkhuizen A.A., Morris R.S., 1987. An economic comparison of four culling decision rules for reproductive failure in United States dairy herds using Dairy ORACLE. *J. Dairy Sci.*, 70, 1274-1280.
- Mialon M.M., Renand G., Krauss D., Ménessier F., 2001. Variability of the postpartum recovery of sexual activity of Charolais cows. *Livest. Prod. Sci.*, 69, 217-226.
- Oltenu P.A., Milligan R.A., Rounsaville T.R., Foote R.H., 1980. Modelling reproduction in a herd of dairy cattle. *Agric. Syst.*, 5, 193-205.
- Oltenu P.A., Rounsaville T.R., Milligan R.A., Foote R.H., 1981. Systems analysis for designing reproductive management programs to increase production and profit in dairy herds. *J. Dairy Sci.*, 64, 2096-2104.
- Palliser C.C., Bright K.P., Macdonald K.A., Penno J.W., Wastney M.E., 2001. Adapting the MOLLY cow model to fit production data from New Zealand animals. *Proc. N.Z. Soc. Anim. Prod.*, 6, 234-236.
- Pérochon L., Ingrand S., Force C., Dedieu B., Blanc F., Agabriel J., 2009. Simbal : a model to simulate functions of a beef cow herd. 7^{ème} Int. Workshop of Modelling Nutrient Digestion and Utilization in Farm Animals. 10-12 Septembre 2009, Paris, France, 1p.
- Pleasant A.B., 1997. Use of a stochastic model of a calving distribution for beef cows for formulating optimal natural mating strategies. *Anim. Sci.*, 64, 413-421.
- Puillet L., Martin O., Tichit M., Sauvant D., 2008. Simple representation of physiological regulations in a model of lactating female: application to the dairy goat. *Animal*, 2, 235-246.
- Puillet L., Martin O., Sauvant D., Tichit M., 2010. An individual-based model simulating goat responses variability and long term herd performance. *Animal*, sous presse.
- Romera A.J., Morris S.T., Hodgson J., Stirling W.D., Woodward S.J.R., 2004. A model for simulating rule-based management of cow-calf systems. *Comp. Electr. Agric.*, 42, 67-86.
- Rotz C.A., Mertens D.R., Buckmaster D.R., Allen M.S., Harrison J.H., 1999. A dairy herd model for use in whole farm simulations. *J. Dairy Sci.*, 82, 2826-2840.
- Rotz C.A., Buckmaster D.R., Comerford J.W., 2005. A beef herd model for simulating feed intake, animal performance, and manure excretion in farm systems. *J. Anim. Sci.*, 83, 231-242.
- Rykiel E.J., 1996. Testing ecological models: the meaning of validation. *Ecol. Model.*, 90, 229-244.
- Sanders J.O., Cartwright T.C., 1979. A general cattle production systems model. I: Structure of the model. *Agric. Syst.*, 4, 217-227.
- Schalloo L., Dillon P., Rath M., Wallace M., 2004. Description and validation of the Moorepark dairy system model. *J. Dairy Sci.*, 87, 1945-1959.
- Schils R.L.M., de Haan M.H.A., Hemmer J.G.A., van den Pol-van Dasselaar A., de Boer J.A., Evers A.G., Holshof G., van Middelkoop J.C., Zom R.L.G., 2007. DairyWise, a whole-farm dairy model. *J. Dairy Sci.*, 90, 5334-5346.
- Schmitz J.D., 1997. Dynamics of beef cow herd size: an inventory approach. *Am. J. Agric. Econ.*, 79, 532-542.
- Sorensen J.T., Kristensen E.S., Thysen I., 1992. A stochastic model simulating the dairy herd on a PC. *Agric. Syst.*, 39, 177-200.
- Tess M.W., Kolstad B.W., 2000. Simulation of cow-calf production systems in a range environment: I. Model development. *J. Anim. Sci.*, 78, 1159-1169.
- Tichit M., Ingrand S., Moulin C.H., Courmout S., Lasseur J., Dedieu B., 2004. Analyser la diversité des trajectoires productives des femelles reproductrices : intérêt pour modéliser le fonctionnement du troupeau bovin allaitant. *INRA Prod. Anim.*, 17, 123-132.
- Tichit M., Puillet L., Sauvant D., 2009. How models contribute to livestock farming system research: overview of recent advances. *Options Méd.*, 293-306.
- Upton M., 1993. Livestock productivity assessment and modelling. *Agric. Syst.*, 43, 459-472.
- Vargas B., Herrero M., Van Arendonk J.A.M., 2001. Interactions between optimal replacement policies and feeding strategies in dairy herds. *Livest. Prod. Sci.*, 69, 17-31.
- Vayssières J., Guerrin F., Paillat J.M., Lecomte P., 2009. GAMEDE: A global activity model for evaluating the sustainability of dairy enterprises Part I. Whole-farm dynamic model. *Agric. Syst.*, 101, 128-138.
- Villalba D., Ripoll G., Ruiz R., Bernués A., 2010. Long-term stochastic simulation of mountain beef cattle herds under diverse management strategies. *Agric. Syst.*, 103, 210-220.
- Webb E.C., Casey N.H., 2010. Physiological limits to growth and the related effects on meat quality. *Livest. Sci.*, 130, 33-40.
- White D.H., Bowman P.J., Morley F.H.W., McManus W.R., Filan S.J., 1983. A simulation model of a breeding ewe flock. *Agric. Syst.*, 10, 149-189.
- Williams C. B., Jenkins T. G., 1998. A computer model to predict composition of empty body weight changes in cattle at all stages of maturity. *J. Anim. Sci.*, 76, 980-987.
- Wood P.D.P., 1967. Algebraic models of lactation curve in cattle. *Nature*, 216, 164-165.

Résumé

La variabilité des réponses individuelles est un élément clé pour comprendre le fonctionnement du troupeau et évaluer ses performances. Cette variabilité repose sur une composante biologique (élaboration de réponses productives liées à l'expression des régulations physiologiques et du génotype) et sur une composante décisionnelle (ensemble de pratiques s'appuyant sur différents niveaux d'organisation du troupeau). Cette synthèse examine dans quelle mesure les modèles de fonctionnement du troupeau existants sont opérationnels pour étudier la variabilité individuelle et faire ainsi progresser notre capacité à prédire les réponses du troupeau aux pratiques. La première partie synthétise les types de réponses biologiques représentés dans les modèles et l'élaboration de ces réponses. La seconde passe en revue les types de pratiques représentés et les niveaux d'information qu'elles mobilisent. La conclusion présente les limites des modèles pour l'étude de la variabilité individuelle. Celles-ci résident dans une vision partielle de la composante biologique (un seul type de réponse biologique, absence des réponses à l'alimentation et des régulations physiologiques) et de la composante décisionnelle (absence d'informations individuelles, un seul type de pratiques représenté, pas de lien entre projet d'élevage, lots et pratiques). Par conséquent, simuler la construction de la variabilité individuelle générée par le fonctionnement du troupeau nécessite de développer un modèle individu-centré avec deux caractéristiques essentielles. La première concerne la formalisation de l'animal en tant qu'entité régulée répondant à son environnement nutritionnel. La seconde concerne la formalisation explicite du lot comme entité de gestion, support d'un système de pratiques d'alimentation, de reproduction et de renouvellement.

Abstract

Interests and limits of the representation of individual variability in dynamic herd models

The variability of individual responses is a key element to understand and evaluate herd performance. It has a biological basis (responses generated by physiological regulations and genotype) and a decisional basis (different management practices involving different herd organisation levels). This review analyses if current dynamic herd models were appropriate to study individual variability and produce knowledge to benefit from it. After analysing the type of biological responses represented in models and how these responses are modelled and then the type of management practices and the herd levels involved to perform these practices, the conclusion presents the models' shortcomings to study individual variability. They emerge from a partial view of the biological basis (only one type of biological response represented, no response to feeding and no regulations) and of the decisional one (no individual information, a single type of practices and no link between farmer's project, groups of animals and practices). As a result, simulating the emergence of individual variability from herd operation requires developing agent-based herd model with two essential characteristics: first, representing the animal as a regulated organism in a nutritional environment and second, formalizing groups of animals as management entities, targeted by a set of feeding, reproductive and replacement practices.

PUILLET L., SAUVANT D., TICHIT M., 2010. Intérêts et limites de la prise en compte de la variabilité individuelle dans les modèles de fonctionnement du troupeau. *Inra Prod. Anim.*, 23, 255-268.