

TRANS

Transformation de l'élevage et dynamique des espaces

**Modélisation des systèmes
d'élevage :
synthèse bibliographique**

Thomas PACAUD (Métafort)
Avec la participation de Sylvie COURNUT (Métafort)

Décembre 2007

Sommaire

Introduction.....	1
Première partie – modélisation et systèmes d'élevage, définitions et concepts.2	
I) Le système d'élevage : de nombreux modes de représentation du réel	2
1) Les approches systémiques des exploitations agricoles : un premier pas vers la modélisation	2
2) La conception tripolaire du système d'élevage	3
3) Une articulation entre deux sous-systèmes.....	5
II) Modélisation et élevage : grands principes	7
1) Une vaste discipline pour deux finalités majeures	7
1.1) Pour décider... ..	7
1.2) ...et pour apprendre et comprendre	8
2) Deux méthodes largement dominantes : l'optimisation et la simulation	10
2.1) Optimisation	10
(a) Dans quel cadre utilise-t-on l'optimisation dans les modèles ?	10
(b) Plusieurs techniques utilisées.....	10
(c) Discussion des intérêts et limites de l'optimisation	10
2.2) Simulation	11
(a) Une association étroite entre un modèle et le temps	11
(b) Une large gamme de techniques.....	12
⇒ <i>Plusieurs oppositions</i>	12
⇒ <i>La spécificité de la simulation multi-agents</i>	14
3) Souvent une combinaison de plusieurs méthodes et techniques de modélisation.	14
Deuxième partie : une grande variété de travaux de modélisation.....	16
I) Quels systèmes d'élevage?	16
1) L'importance du facteur géographique dans les représentations.....	16
1.1) Systèmes inscrits dans une logique économique de subsistance.....	16
1.2) Systèmes inscrits dans une logique d'économie de marché.....	16
2) Pour quelles productions animales ?.....	17
II) Une interaction entre plusieurs composantes : comment situer les modèles et quelles articulations mises en jeu ?	18
1) Quelle est la place du troupeau dans la représentation du système?.....	18
2) Qu'en est-il du territoire : une réelle dimension spatiale?	20
2.1) La dimension spatiale et les changements d'échelles	20
2.2) Quelles questions sur le territoire?	22
(a) En terme de résistance des systèmes aux aléas	22
(b) En terme de durabilité des systèmes	22
(c) En terme de diversité prairiale	22
3) Quelles articulations entre troupeau et territoire ?	23
(a) Prise en compte des déjections animales et du cycle de l'azote	23

(b)	Des modèles focalisés sur le processus de pâture et les performances zootechniques.....	23
⇒	Modélisation du comportement de l'animal au pâturage.....	23
⇒	Modélisation de la gestion du pâturage.....	24
(c)	Des modèles élargissant de gestion du système fourrager dans sa globalité.....	25
4)	Et l'homme ?.....	25
4.1)	Dans les aspects économiques.....	26
4.2)	...et d'organisation du travail.....	27
III)	Quelles particularités du système d'élevage prises en compte dans les modèles ?	28
1)	Les questions de temporalité	28
1.1)	La caractéristique pluriannuelle du système d'élevage et la prise en compte du passé.....	28
1.2)	Pas de temps et superposition d'échelles temporelles	30
2)	La diversité des entités biophysiques.....	31
2.1)	Diversité des entités animales.....	31
2.2)	Diversité des entités relatives au territoire.....	32
3)	La représentation d'aléas.....	32
Troisième partie : le processus de décision dans les travaux de modélisation		35
I)	Quelles entités de gestion ?.....	35
1)	Entités de gestion : éléments utilisés par les agriculteurs dans leur processus de décision ?	35
2)	La prise en compte de plusieurs niveaux de gestion	36
2.1)	Représentation des niveaux décisionnels.....	36
2.2)	La question des entités de gestion relatives.....	37
(a)	...au troupeau	37
(b)	...aux surfaces.....	38
II)	Comment sont représentés les décisions ?	39
1)	Par une définition de scénarios ou d'ensembles de règles de décision.....	39
2)	...ou par une réelle formalisation du processus de décision.....	40
2.1)	Autour du modèle d'action.....	40
2.2)	Autres cadres de représentation.....	41
2.3)	La prépondérance du temps.....	42
2.4)	L'expression d'une cohérence des décisions.....	43
III)	Une articulation avec le système biotechnique très peu étudiée	43
1)	Adaptation de la décision et flux.....	44
2)	Quelles adaptations prises en compte dans les modèles ?	44
Conclusion.....		46
Références.....		48
Annexes		62

Introduction

Cette synthèse bibliographique, engagée dans le cadre d'une réflexion autour du développement d'un modèle d'exploitation d'élevage (intégré dans le projet ADD-TRANS, Transformation de l'élevage et dynamique des espaces) s'intéresse aux apports de la littérature internationale à propos de la modélisation des systèmes d'élevages. Tout d'abord, c'est l'échelle d'organisation de l'exploitation agricole qui est ciblée, même si la représentation de certains phénomènes plus fins (notamment à l'échelle de l'animal ou de la plante) ou plus englobant (comme les dynamiques à l'échelle territoriale) ne peut être complètement écartée des propos car ces phénomènes sont souvent considérés comme directement reliés au fonctionnement du système d'élevage. D'autre part, le terme « modélisation » doit être perçu dans son sens le plus large, et, comme nous le verrons ultérieurement, il recouvre un grand nombre de notions. L'annexe 1 donne un aperçu de la méthodologie employée pour les requêtes et quelques repères bibliométriques relatifs à ce travail.

Aujourd'hui, le développement de la modélisation des activités agricoles révèle un intérêt grandissant notamment pour étudier les dynamiques d'évolution des systèmes, en particulier concernant la question de l'adaptation des systèmes à de nouvelles combinaisons d'enjeux. Renouveler le cadre d'étude des systèmes d'élevage est une ambition fréquemment affichée dans les projets de recherche. Le développement de modèles utilisant des points de vue et des méthodes de représentations variés contribue de manière importante à ce renouvellement. Pour comprendre le fonctionnement des exploitations agricoles, plusieurs auteurs évoquent deux approches conceptuelles, l'une centrée sur l'analyse des pratiques des agriculteurs et l'autre qui s'attache à comprendre comment les agriculteurs prennent leurs décisions (Sébillotte & Soler 1990) repris par (Girard 1995). Dans cette optique, Cournut qualifiera la modélisation systémique de l'activité agricole comme « une démarche permettant de rendre compte d'un ensemble de décisions humaines finalisées, d'actions concrètes et matérielles orientant des processus biologiques et de formaliser les liens complexes qui les associent » (Cournut 2001). La modélisation dynamique du fonctionnement des élevages est aussi un moyen de s'intéresser à des cohérences de plusieurs ordres, notamment techniques, économiques et sociales (Martin-Clouaire, Duru *et al.* 2006).

Ces considérations jettent les bases du plan de cette étude ; il s'agira dans un premier temps de présenter un certain nombre d'approches et de concepts relatifs au système d'élevage et à la démarche de modélisation afin de mieux cerner les principaux courants et d'en révéler toute la diversité. L'étape suivante va consister à se projeter au cœur des modèles pour mieux analyser les postures adoptées dans les représentations du réel. La dernière partie met l'accent sur la place particulière qu'occupe l'agriculteur dans les représentations, en particulier lorsque les modèles cherchent à rendre compte de son comportement décisionnel.

Première partie – modélisation et systèmes d'élevage, définitions et concepts

1) Le système d'élevage : de nombreux modes de représentation du réel

1) Les approches systémiques des exploitations agricoles : un premier pas vers la modélisation

Différentes approches permettent de décrire les exploitations agricoles et leur fonctionnement. Le système d'élevage est une perception particulière de l'exploitation agricole dans le sens où la notion de système implique une construction théorique que forme l'esprit sur un sujet. Certains auteurs parleront d'une représentation finalisée du réel construite pour faciliter la décision et orienter les choix d'action en fonction d'objectifs divers (Le Moigne 1990; Landais & Bonnemaire 1996) ; c'est l'apport de modifications dans ces représentations du réel qui accompagne les comportements innovants. Cette analyse de systèmes complexes ne peut être pertinente par des approches classiques d'additions de moyens et de techniques de production, de juxtaposition de modes d'utilisation du sol, etc. (Osty 1978). C'est pourquoi l'analyse systémique d'une exploitation agricole se justifie dans le sens où elle permet de compenser le fait que le schéma de causalité linéaire n'est pas opérant pour rendre compte du fonctionnement de l'ensemble.

Face à la multitude de définitions du système d'élevage proposées, nous retiendrons l'une des plus complètes et la plus fréquente dans la littérature, qui est celle formulée par Landais. Il décrit le système d'élevage comme « *un ensemble d'éléments en interaction dynamique organisé par l'homme en vue de valoriser des ressources par l'intermédiaire d'animaux domestiques pour en obtenir des productions variées ou pour répondre à d'autres objectifs* » (Landais 1987; Landais & Bonnemaire 1996). Le système d'élevage est inexistant, ce serait plutôt une conception ou une représentation où « *le choix des éléments et des relations privilégiées relève d'une décision arbitraire de l'observateur selon des objectifs propres et les résultats attendus* ». Cette déclaration met l'accent sur la variabilité des concepts et des mécanismes pouvant être mobilisés à travers la notion de système d'élevage. Selon les « objectifs propres » des auteurs reliés à des attentes disciplinaires voire pluridisciplinaires, différents points de vue sont adoptés ; bien que rarement explicités et justifiés, ces différents angles d'attaque sont illustrés dans la diversité considérable des approches de modélisation.

Un autre élément qui contribue à cette variabilité est l'émergence de la notion de multifonctionnalité des exploitations agricoles. Aujourd'hui, outre les aspects productifs et le rôle dans les filières alimentaires et dans l'économie, certains auteurs évoquent d'autres fonctions du système d'élevage ou plus généralement du système d'exploitation (Crosson, O'Kiely *et al.* 2006) comme son rôle dans le maintien des espaces ruraux et du tissu social ou encore sa contribution à l'évolution et à la diversité des paysages (Depigny 2007). La

prise de conscience de ces différentes fonctions n'est pas sans lien avec la diversité des points de vue adoptés et des spécificités mises en avant pour analyser et représenter le système d'élevage. Comme l'illustre la figure 1, trois points de vue principaux peuvent être distingués (Landais & Bonnemaire 1996) :

- Le point de vue zootechnique qui se focalise sur les processus biotechniques mis en jeu dans la production animale ;
- Le point de vue économique qui est centré sur les processus technologiques, les relations sociales et les conventions économiques au sein des filières de commercialisation ;
- Le point de vue géographique qui s'intéresse aux processus spatiaux.

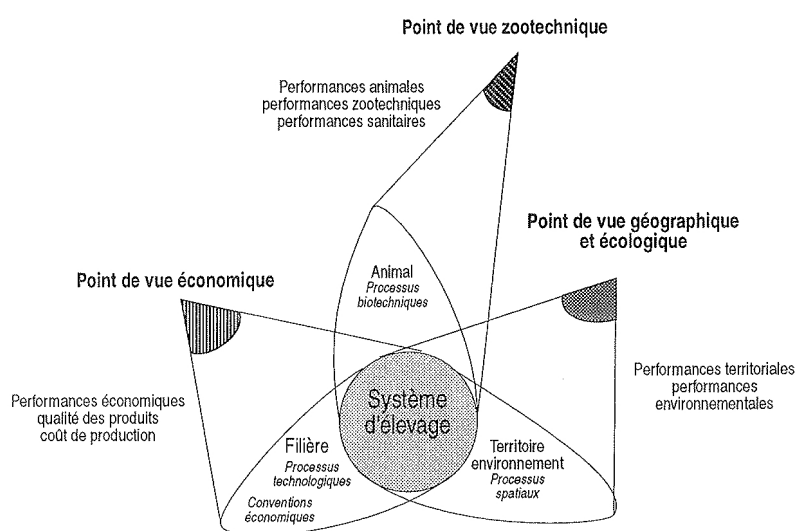


Figure 4. Trois points de vue sur les systèmes d'élevage

Figure 1 : trois points de vue sur les systèmes d'élevage (Landais & Bonnemaire 1996)

Ces différents regards sont intimement liés aux différentes conceptions qui sont décrites dans les chapitres suivants.

2) La conception tripolaire du système d'élevage

Parmi les diverses représentations du système d'élevage présentes dans la littérature francophone, figure un schéma proposé originellement par Lhoste puis repris et complété par Landais. Cette conception, dont une version est proposée en figure 2, définit le système d'élevage comme un système piloté à trois pôles dont le pilote est l' « éleveur », identifié comme le pôle principal en interaction avec un pôle « troupeau » et un pôle « territoire » (Lhoste 1984; Landais 1987; Landais 1992). C'est au sein du pôle « éleveur » que Landais situe une dimension « travail » et il souligne que « différentes études ont souligné l'importance que prend ce facteur [le travail] dans les motivations et les choix des éleveurs,

et il n'est plus possible de le négliger ». Lhoste a également associé les notions de « niveaux de décision » ou de « projets » à ce pôle « éleveur » dans le sens où il est le siège du processus décisionnel. Pour définir la composante « troupeau », Landais parle d'une structure sociale constituée par l'homme pour répondre à des objectifs donnés, avec plusieurs perceptions : il peut être vu comme un agrégat dont les caractéristiques résultent de la somme des individus qui le composent ou bien comme une véritable entité avec ses propres règles de fonctionnement.

Outre l'importance du temps, la dimension spatiale du système d'élevage, que l'on peut situer dans la composante « territoriale » de ce schéma est parfois considérée comme une dimension majeure (Milleville, Combes *et al.* 1982; Hubert & Girault 1988; Landais 1993; Deffontaines & Lardon 1994; Hubert 1994; Landais & Bonnemaire 1996). Le « territoire » qui ne doit pas être réduit à des surfaces fourragères exploitées « doit être perçu comme un milieu structuré, support contrasté -dans l'espace et dans le temps- de ressources et de contraintes » (Landais & Bonnemaire 1996).

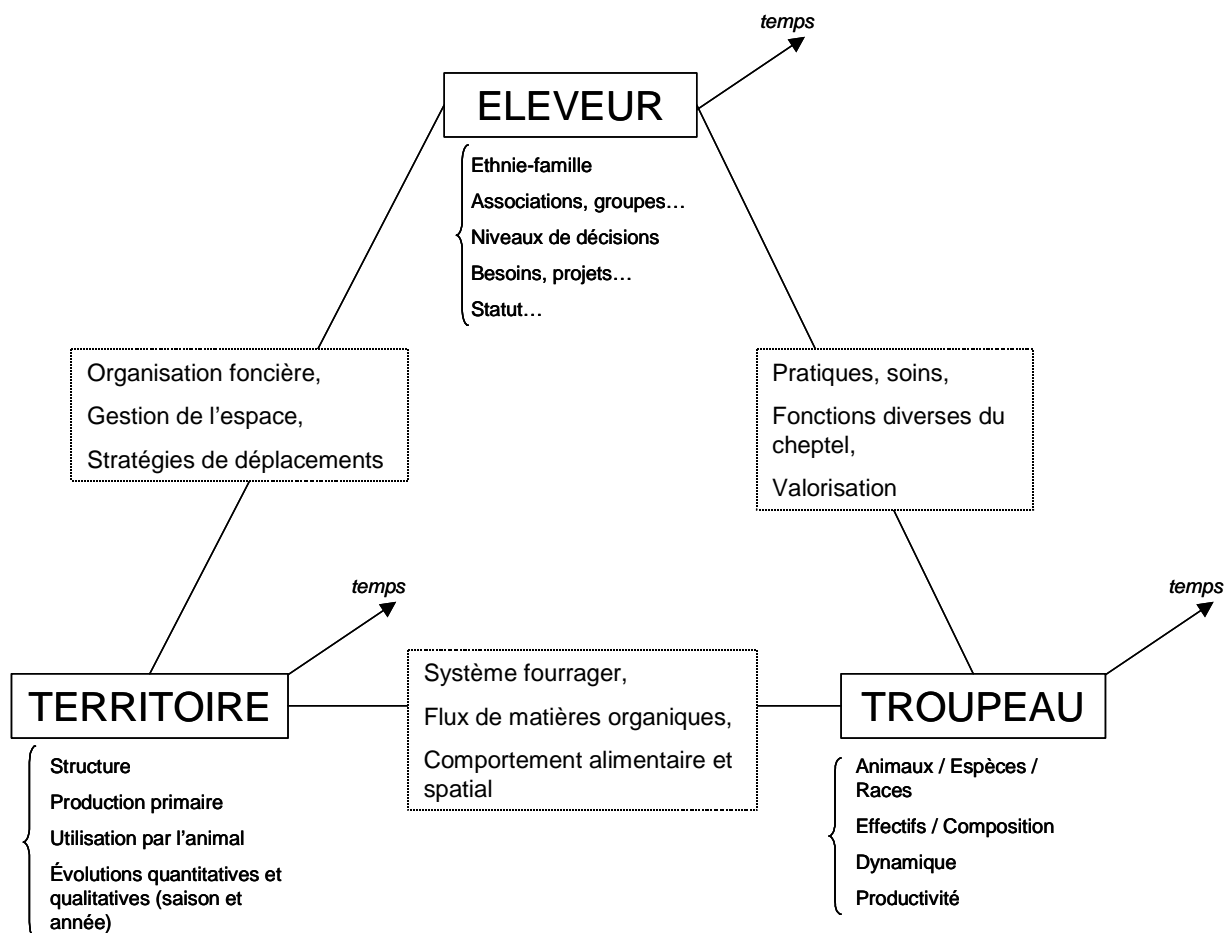


Figure 2 : Schéma développé du système d'élevage : pôles et interfaces (Lhoste 1984)

Plusieurs variantes du schéma tripolaire ont été proposées avec quelques évolutions terminologiques : les travaux de Balent et Gibon évoquent notamment un pôle « ressources » (incluant territoire et travail) et un pôle « gestion » (centré sur le processus de

décision) (Balent & Gibon 1987) remplaçant respectivement le pôle « *territoire* » et le pôle « *éleveur* » du schéma originel. Landais *et al.* ajoutent un quatrième constituant dans cette représentation homme-animal-ressources : les produits (Landais & Bonnemaire 1996). De même, d'autres schémas intègrent plusieurs niveaux d'organisation, d'où un emboîtement de triangles comme le schéma des « *niveaux d'organisation successifs du système pastoral* » (Balent & Gibon 1987), qui permet de visualiser les différentes échelles spatiales et temporelles et les interactions entre les 3 pôles à ces 3 niveaux. A propos des systèmes porcins, Martel *et al.* parleront d'un équilibre entre les dimensions « animaux », « bâtiments » et « éleveur » (Martel, Dedieu *et al.* 2006).

3) Une articulation entre deux sous-systèmes

Une autre représentation conceptuelle du système d'élevage, reprise dans certaines publications internationales met en avant un pôle lié à l'agriculteur, appelé pôle de gestion ou de décision, en articulation avec un pôle biophysique ou biotechnique. Dans cette conception, l'homme prend une place tout à fait spécifique puisqu'il n'apparaît plus comme un élément du système mais comme l'organisateur, le pilote au sein d'un sous-système décisionnel qui intervient sur un sous-système biotechnique (Landais 1987). Les premières versions de ce modèle conceptuel font état d'un couplage entre un modèle d'élaboration des décisions et un modèle d'élaboration des productions ; cette articulation repose sur la modélisation des flux d'information qui alimentent la prise de décision et sur la modélisation des pratiques. C'est la combinaison des pratiques qui constitue la principale sortie du processus décisionnel et la principale entrée pour les processus biotechniques (Landais & Bonnemaire 1996).

Dans certains travaux australiens, une articulation est matérialisée entre un « *système de production* » comportant animaux, plantes, sol et climat, avec certains flux physiques d'entrée et de sortie et un « *système de gestion* » fait de personnes, valeurs, objectifs, connaissances, ressources, opportunités de pilotage et prise de décision (Keating & McCown 2001). Ce point de vue repris de la modélisation conceptuelle du système d'exploitation agricole faite par Sorensen *et al.* et illustrée en figure 3 établit une relation cybernétique, ie qui est dynamique, complexe et adaptative entre les deux composantes de gestion et de production : le système de production est piloté et contrôlé pour atteindre des objectifs de gestion. Le schéma (a) illustre ce système cybernétique avec l'action du contrôle (« *monitoring* ») qui s'applique sur le système de gestion et le phénomène d'adaptation (« *adjustment* ») qui agit sur le système de production. Cette propriété d'adaptation est traduite dans le schéma (b) par les interventions agricoles ou pratiques, qui sont les symboles rationnels de ces phénomènes et qui sont une porte d'entrée privilégiée pour analyser les systèmes agricoles (Sorensen, Kristensen *et al.* 1992; Keating & McCown 2001). D'autres dénominations sont utilisées pour qualifier les flux entre les deux sous systèmes : Guerrin parlera de « réseaux d'interaction » entre flux biophysiques (processus naturels) et flux « agissables » (générés par les activités humaines) (Guerrin 2007).

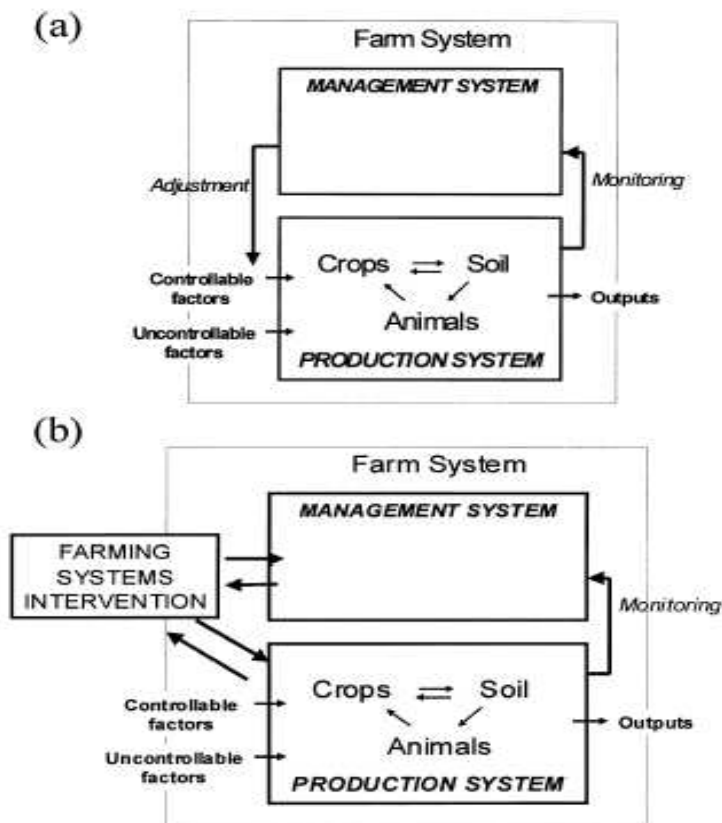


Figure 3 :
représentation du
système d'exploitation
sous forme d'un réseau
cybernétique ; a) mise
en évidence des
concepts de contrôle et
d'adaptation ; b)
l'intérêt des pratiques
agricoles pour l'analyse
des systèmes (Keating
& McCown 2001)

L'articulation décisionnel-biotechnique est souvent évoquée dans le cadre du développement de modèles de simulation. Ainsi cette nécessité de prendre en compte la dimension décisionnelle en interaction avec la composante biotechnique est capitale pour simuler des dynamiques de systèmes comme le fonctionnement de troupeaux (Cournut 2001; Keating & McCown 2001). Des travaux mentionnent clairement cette formalisation d'aspects décisionnels et biotechniques, c'est notamment le cas de modèles démographiques du troupeau (Frasier & Pfeiffer 1994; Lehenbauer & Oltjen 1998; Lesnoff 2000).

Ces schémas et conceptions du système d'élevage correspondent bien à une volonté de représentation du réel, et dans ce sens, ils coïncident avec la définition large du mot « modèle ». Mais ils sont en même temps caractérisés par leur synchronisme et ils n'expriment intrinsèquement aucune dimension temporelle. Or la question du fonctionnement de tels systèmes n'a aucun sens sans cette notion (Landais 1987). Caractériser le fonctionnement d'un système dynamique implique nécessairement l'expression d'une temporalité. La partie qui suit nous conduira à travers la diversité des modèles qui sont fortement imprégnés de cette dimension temporelle, ces modèles pouvant être conceptuels ou bien avoir débouché sur une implémentation. La place des représentations conceptuelles évoquée dans les chapitres précédents est largement présente et sous-jacente à de nombreux travaux.

II) Modélisation et élevage : grands principes

1) Une vaste discipline pour deux finalités majeures

« A model is at best an imperfect representation of the real system » (Pandey & Hardaker 1995; Chawatama, Ndlovu *et al.* 2003), reprend la définition retenue dans la première partie et ajoute la notion de simplification qui est inhérente à tout travail de modélisation. La finalité d'un travail de modélisation peut revêtir plusieurs aspects : réponse à une question scientifique, création d'un outil opérationnel pour l'aide à la décision, représentation d'un système, apports pédagogiques... C'est en général une combinaison de différents objectifs qui dirige le travail de modélisation et c'est parfois le processus de modélisation qui crée lui-même les besoins et conjointement permet de fixer une ou plusieurs finalités au gré de l'expertise et des réflexions collectives. Coquillard *et al.* définissent un modèle comme une abstraction qui simplifie le système réel pour se focaliser sur des aspects qui intéressent le modélisateur (reliés à des enjeux disciplinaires) et qui définissent la problématique du modèle (Coquillard & Hill 1997). Le terme générique de modèle recouvre également deux grands types de modèles appelés par Juristo *et al.* les « conceptual models » et les « computable models ». Dans ce dernier type de modèle, le processus de modélisation diffère dans le sens où le modèle doit incorporer les concepts sous-jacents à l'outil envisagé (Juristo & Moreno 2000).

Parmi les différentes finalités, deux sont très nettement dominantes dans la littérature : la modélisation pour l'aide à la décision d'acteurs et la modélisation pour l'apport de connaissances.

1.1) Pour décider...

Par définition, un modèle ou un système (au sens outil) a une finalité d'aide à la décision quand il a pour objectif de faciliter ou d'améliorer le processus de prise de décision stratégique ou opérationnelle d'acteurs, qui évoluent dans un environnement plus ou moins précis et plus ou moins incertain (Attonaty, Chatelin *et al.* 1999). Dans le domaine des systèmes d'élevage, les acteurs concernés dans les modèles d'aide à la décision sont rarement cités, mais il s'agit généralement soit des agriculteurs eux mêmes, soit des techniciens de l'encadrement agricole qui interviennent au niveau du pilotage des exploitations (Cabrera, Hildebrand *et al.* 2006). Ces modèles pour l'aide à la décision, aussi appelés « modèles pour l'action » traitent de tous les champs d'étude relatifs à l'exploitation agricole. Les modèles de fonctionnement des systèmes, plutôt destinés pour le monde de la recherche et descriptifs sont souvent confondus avec des systèmes ou outils d'aide à la décision basés sur des modèles et qui visent à agir sur les pratiques des agriculteurs (Cox 1996).

C'est une des raisons pour laquelle les modèles d'aide à la décision destinés à améliorer les pratiques agricoles n'ont pas toujours suscité un intérêt important chez les producteurs (Cox 1996; Kamp 1996; McCown 2002; Cerf & Meynard 2006; Aubry 2007).

D'autres raisons sont parfois mentionnées : des raisons liées au support technique nécessaire, à l'obtention de données pour alimenter les outils, etc. Diaz-Solis *et al.* évoquant spécifiquement les modèles pour piloter le pâturage déplorent que le manque de bases de données adéquates pour alimenter les modèles (besoins de données trop conséquents) ou la complexité des sorties du modèles « *ont limité leur application dans la gestion des prairies* » (Diaz-Solis, Kothmann *et al.* 2003; Diaz-Solis, Kothmann *et al.* 2006). Bien que ces modèles soient souvent qualifiés par leurs auteurs de modèles « simples » - eg (Diaz-Solis, Kothmann *et al.* 2003)-, il semblerait que des améliorations soient nécessaire dans les modalités d'intégration des données mais aussi de l'utilisation pratique de ces systèmes.

Aubry alimente la réflexion concernant les intérêts d'utiliser des représentations conceptuelles de décisions dans les modèles implémentés, notamment dans les outils d'aide à la décision. Elle évoque notamment l'idée d'ouvrir à l'utilisateur la possibilité de tester en « chambre » (Queau 1986; Aubry 2007). Ainsi, la finalité des modèles « pour décider » n'est pas tant d'aider à la réflexion d'un acteur réel mais plutôt d'aider à la réflexion sur des modifications décisionnelles. Ces considérations, au cœur des débats sur les « Decisional Support Systems » soulèvent également les questions d'identification de marges de manœuvre décisionnelles (Joannon 2004).

Les modèles qui affichent une finalité d'aide à la décision sont relativement nombreux et sont tous des modèles implémentés. Certains projets de recherche ont abouti au développement d'un grand nombre d'outils, comme le programme australien « GrazPlan Decision Support System » qui permet de représenter le système d'exploitation dans son intégralité avec un assemblage de différents modules pouvant fonctionner indépendamment. L'ensemble permet de tester la pertinence de différentes logiques de gestion du système d'exploitation pour des fermes individuelles (Donnelly, Moore *et al.* 1997; Donnelly, Freer *et al.* 2002). D'autres outils sont spécifiquement dédiés à la conduite du pâturage de vaches laitières –eg.(Cros, Duru *et al.* 2001) et (Delaby, Peyraud *et al.* 2000).

1.2) ...et pour apprendre et comprendre

La deuxième grande finalité et caractéristique des modèles est leur apport de connaissances à plusieurs niveaux. Jouven met en évidence cet apport en deux temps ; d'une part, pendant la phase d'élaboration du modèle, la réflexion autour de l'intégration de la connaissance dans le modèle peut permettre de dégager certaines propriétés émergentes et d'étudier le fonctionnement d'un système difficile à décrire par les méthodes classiques. D'autre part, à partir des simulations effectuées grâce au modèle, il est possible de répondre à un certain nombre de questions scientifiques difficilement traitées dans les réflexions classiques (Jouven 2006). Ezanno ajoute que le modèle, en permettant la simulation de situations extrêmes ou innovantes, ou simplement en prenant en compte des échelles de temps et d'espace englobantes est un moyen privilégié pour s'affranchir des contraintes d'observation et d'expérimentation de terrain (Ezanno 2005).

Le modèle pour apprendre et/ou comprendre s'inscrit dans la notion de « Knowledge representation » définie par Davis *et al.* et reprise par Guerrin (Davis, Shrobe *et al.* 1993; Guerrin 2007). Cette notion peut se décliner en 5 composantes : un substitut du réel, une ontologie, un schéma de rationalité, un cadre computationnel et un langage de communication. Ces modèles aident à « mieux comprendre pour mieux gérer » (Guerrin 2007) : une démarche de modélisation doit non seulement permettre de mieux comprendre « les bonnes raisons que les agriculteurs ont de faire ce qu'ils font » mais surtout de comprendre leurs marges de manœuvre et d'en découvrir de nouvelles.

Juristo *et al.* déclinent cette finalité d'apport de connaissances en plusieurs buts (Juristo & Moreno 2000) :

- Un but de compréhension : représenter un système réel et un problème à résoudre ;
- Un but de communication : utilisation d'un langage compréhensible ;
- Un but de synthèse : mise à plat de la connaissance à incorporer dans le modèle.

Certaines méthodes de modélisation du fonctionnement et de l'organisation de l'exploitation agricole sont spécifiquement dédiées à la compréhension des systèmes. Une étude comparative, construite à partir de critères relatifs à la modélisation des entreprises a été réalisée par Apt *et al.* (Apt, Pierreval *et al.* 2006) et en délivre un aperçu détaillé. Citons les 3 méthodes les plus utilisées :

- L'AGEA (Analyse Globale de l'Exploitation Agricole) ; c'est la méthode la plus utilisée sur le terrain qui permet de comprendre le fonctionnement et qui a une vocation pédagogique pour l'étude des systèmes d'exploitation (Bonneviale, Russiau *et al.* 1989; Marshall, Bonneviale *et al.* 1994) ;
- La GEEA (Guide d'Etude de l'Exploitation Agricole) ; proposée par Capillon et Manichon, cette méthode a les mêmes objectifs que la précédente (Capillon & Manichon 1991) ;
- L'ASEA (Approche Spatiale de l'Exploitation Agricole) ; cette méthode, comme son nom l'indique vise à la compréhension de l'organisation spatiale des activités agricoles en plus d'objectifs similaires aux deux autres méthodes (Naïtlho, Lardon *et al.* 2003).

Des modèles implémentés peuvent être spécifiquement conçus pour la recherche et l'apport de connaissances. Les modèles affichant de telles finalités sont pour la plupart destinés à étudier l'impact de stratégies de conduite ou d'évolutions climatiques notamment sur le fonctionnement du système fourrager (Parsons, Armstrong *et al.* 2001; Turnpenny, Parsons *et al.* 2001; Fitzgerald, Brereton *et al.* 2005).

2) Deux méthodes largement dominantes : l'optimisation et la simulation

2.1) Optimisation

(a) Dans quel cadre utilise-t-on l'optimisation dans les modèles ?

Les modèles basés sur des techniques d'optimisation sont les modèles où le fonctionnement du système est basé sur un ou plusieurs objectifs explicites qui est (sont) sensé(s) refléter le comportement du preneur de décision ou ses objectifs. C'est ce qui est, en général, matérialisé par une (des) fonction(s) objectif(s).

Les modèles d'optimisation relatifs aux systèmes d'élevage visent à optimiser certaines pratiques agricoles ou stratégies (gestion) ou à identifier un système optimal, le plus souvent dans un but purement économique, parfois technique. Certains sont dédiés aux systèmes ovins viande (Donnelly, Freer *et al.* 2002; Janssen, Anderies *et al.* 2004), d'autres s'intéressent aux systèmes bovins laitiers (Berentsen & Giesen 1995; Herrero, Fawcett *et al.* 1999; Berentsen, Giesen *et al.* 2000; Pacini, Wossink *et al.* 2004; van Calster, Berentsen *et al.* 2004) ou encore aux systèmes bovins allaitants (Nielsen, Groen *et al.* 2004; Costa & Rehman 2005; Veysset, Bebin *et al.* 2005; Crosson, O'Kiely *et al.* 2006).

(b) Plusieurs techniques utilisées

Dans le panorama des modèles étudiés, 2 principales techniques restent dominantes:

- La programmation linéaire, de loin la plus fréquente dans les modèles des systèmes d'élevage qui implique que la fonction objectif et les contraintes évoluent de manière linéaire (Jacquet-Lagrange 1998; Gueret, Prins *et al.* 2000) ;
- La programmation dynamique qui admet qu'une solution optimale se compose nécessairement de sous-solutions optimales (Kennedy 1986).

Dans les modèles très récemment développés, l'optimisation multi-objectifs ou multi-critères est de plus en plus utilisée : elle consiste à optimiser plusieurs objectifs en même temps, ce qui implique la recherche d'un ensemble de solutions qu'il convient d'étudier (Wallenius, Wallenius *et al.* 1978; Roy & Hugonnard 1982). Le modèle Tournesol, développé par Garcia *et al.* qui cherche à représenter la gestion des assolements est basé sur cette méthode (Garcia, Favardin *et al.* 2005).

(c) Discussion des intérêts et limites de l'optimisation

Quelques arguments en faveur de l'optimisation sont avancés par Stonehouse *et al.* (Stonehouse, Vos *et al.* 2002) ; ces auteurs caractérisent les modèles d'optimisation comme :

- Etant proches du mode de décision de l'agriculteur ;

- Permettant la prise en compte de contraintes variées ;
- Particulièrement adaptés à l'évaluation de politiques environnementales.

Attonaty *et al.* évoquent l'intérêt des modèles d'optimisation en tant que supports de réflexion pour produire de nouveaux éléments de discussion notamment pour comparer avec des solutions existantes et favoriser l'émergence de nouvelles idées à utiliser dans les situations réelles (Attonaty, Chatelin *et al.* 1990). Graves *et al.* parleront de l'utilisation massive des modèles d'optimisation, cette utilisation étant plus fortement ancrée dans une logique de conception de nouveaux systèmes que dans une logique de gestion de ces systèmes (Graves, Rinnooy Kan *et al.* 1993).

Cros *et al.* émettent quelques réserves dans l'utilisation de l'optimisation dans les questions de stratégies de gestion des exploitations agricoles dans le sens où i) il n'y a généralement pas une seule solution optimale qui répond à un problème particulier dans la gestion « *car l'efficacité d'une solution dépend de contraintes spécifiques et du jugement subjectif de l'agriculteur* » et ii) la gestion d'un système de production agricole est généralement trop complexe pour être représentée de manière pertinente par l'optimisation et la nécessité de simplifier la représentation des stratégies a pour conséquence leur impossibilité de réalisation dans la pratique (Cros, Duru *et al.* 2004).

Weersink *et al.* ajoutent que les modèles d'optimisation spécifient systématiquement une hypothèse de comportement (eg maximisation du profit), ce qui les différencie des modèles de simulation (Weersink, Jeffrey *et al.* 2002). Cette notion d'hypothèse de comportement rejoint le débat sur la rationalité que le modélisateur prête à l'éleveur : Aubry reprendra les travaux de Simon (Simon 1978) pour évoquer le paradigme de rationalité substantive caractéristique des méthodes d'optimisation (de facto, l'individu preneur de décisions dispose de toute l'information pour prendre la décision optimale et ses objectifs pourraient être listés par ordre de préférence (Attonaty, Chatelin *et al.* 1990)) qu'elle distingue de la rationalité procédurale, plus en adéquation avec le comportement réel d'un agriculteur, qui implique que les décisions sont issues d'une réflexion plus appropriée et conduit à la recherche de solutions « satisficing » plutôt que des solutions optimales (Aubry 2007). Le concept de rationalité limitée des agents, lui aussi issu des travaux de Simon, conçoit que l'agent intervient dans des conditions de connaissance incomplète et de limitation d'analyse de l'information disponible, en plus d'autres facteurs comme la difficulté à choisir un avenir préférable à un autre (March 1978; Simon 1978; Morales Grosskopf 2007).

2.2) Simulation

(a) Une association étroite entre un modèle et le temps

Les méthodes de simulation sont fréquemment opposées aux méthodes d'optimisation (Jalvingh, Arendonk *et al.* 1993; Jalvingh, Arendonk *et al.* 1993; Coleno & Duru 1999; Cournut 2001; Stonehouse, Vos *et al.* 2002; Weersink, Jeffrey *et al.* 2002; Cros, Duru *et al.* 2004; Guerrin 2007).

La modélisation par simulation permet une meilleure révélation des clés, des leviers et des processus (Cros, Duru *et al.* 2004). Elle permet entre autres de :

- rendre compte de la complexité de la relation entre les processus décisionnel et biophysique ;
- prendre en compte le rôle essentiel des événements aléatoires (comme l'aléa climatique) ;
- tester des règles de gestion et ainsi explorer les problèmes de gestion des exploitations agricoles ;
- situer les marges de manœuvre les plus importantes pour cibler où peuvent intervenir des améliorations.

Coleno *et al.* ajoutent que la simulation est utile quand la question n'est pas de trouver une solution optimale mais d'explorer la diversité des solutions possibles pour identifier les paramètres qui apporteraient une amélioration significative (Coleno & Duru 1999).

D'autres auteurs mettent en avant une prépondérance du rapport au temps dans les modèles de simulation, beaucoup moins exprimée dans les modèles d'optimisation. Hill précise que « *la simulation consiste à faire évoluer une abstraction d'un système au cours du temps afin d'aider à comprendre le fonctionnement et le comportement de ce système et à appréhender certaines de ses caractéristiques dynamiques dans l'objectif d'évaluer différentes décisions* » (Hill 1993).

(b) Une large gamme de techniques

⇒ *Plusieurs oppositions*

La variabilité des processus mis en jeu dans le fonctionnement d'un système d'élevage est à l'origine d'une très grande diversité dans les choix de méthodes de simulation. Outre le niveau d'abstraction et l'échelle d'étude, un certain nombre de choix techniques doit être effectué ; c'est le cas du cadre temporel du modèle avec une opposition faite entre les modèles de simulation à temps continu et les modèles de simulation discrète où le temps est divisé en intervalles au cours desquels il ne se passe rien. La modélisation par événements discrets est surtout employée dans les modèles de fonctionnement de troupeau .

il peut être notamment question de l'introduction de méthodes stochastiques pour représenter la complexité et l'aspect aléatoire de certains phénomènes naturels. Cette introduction de l'aléa peut s'opérer de différentes façons :

- L'utilisation d'équations différentielles stochastiques dans le cas de modèles mathématiques basés sur des équations (Pleasant, Wake *et al.* 1997) ; cette technique prend en compte le fait que beaucoup de variables qui affectent le système modélisé agissent à des échelles de temps plus rapides que celles des variables du modèle. C'est l'incertitude relative à l'effet de ces variables « rapides » sur le système qui est déterminé par une densité de probabilités.
- Le recours au principe de Monte-Carlo qui repose sur la loi des grands nombres : en répétant un grand nombre de fois une expérience (comme une simulation), de façon (théoriquement) indépendante, on obtient une approximation de plus en plus fiable de la vraie valeur de l'espérance du phénomène observé ;
- L'utilisation des techniques de Markov qui sont des processus stochastiques qui permettent de prédire l'état futur du système à partir de l'état présent (Yates & Rehman 1998; Nielsen, Groen *et al.* 2004; Wolfova, Wolf *et al.* 2005) ; les changements d'état des entités du système sont gouvernés par des distributions de probabilités qui introduisent un aléa. Dans le cadre d'analyses de modèles relatifs au fonctionnement du troupeau et notamment des systèmes porcins, les modèles de Markov sont opposés aux modèles à événements discrets (Martel, Dedieu *et al.* 2006).

Ces méthodes stochastiques sont mises en parallèle avec les méthodes déterministes, où, à une « condition initiale » donnée à l'instant « présent » va correspondre à chaque instant ultérieur *un et un seul* état « futur » possible. Les modèles purement déterministes ne permettent pas la prise en compte de l'aléa et représentent de manière peu réaliste certains phénomènes biologiques. L'introduction de l'aléa dans les modèles permet de faire émerger de nouveaux enjeux qui ne peuvent être présents dans le cas des modèles déterministes (Pleasant, Wake *et al.* 1997), notamment des enjeux de compréhension de l'impact des phénomènes naturels sur le fonctionnement du système d'élevage.

Une comparaison est parfois réalisée entre techniques mécanistes et techniques empiriques, les premières étant destinées à révéler plus ou moins finement certains processus ou phénomènes et les secondes s'appuyant sur l'expérimentation ou l'observation. Delagarde et O'Donovan décrivent les modèles empiriques comme un système à plusieurs variables connues et les modèles mécanistes comme « une série d'équations imbriquées » (Delagarde & O'Donovan 2005) mais ces auteurs rappellent que la plupart des modèles mécanistes incluent des composantes empiriques car certains mécanismes représentés sont basés sur de l'expertise ou des données de la littérature. Plusieurs travaux mettent l'accent sur cette complémentarité des données empiriques avec les approches mécanistes, citons les contributions à la session « Mechanical models and expert knowledge : how to integrate ? » du congrès Farming System Design (Catane, 2007) parmi lesquelles celle de Pacaud *et al.* (Pacaud, Cournut *et al.* 2007) qui montre la diversité

des sources d'information et des connaissances à intégrer dans un modèle de système d'élevage bovin laitier.

⇒ *La spécificité de la simulation multi-agents*

La simulation multi-agents connaît actuellement un essor très important dans le cadre de la modélisation des systèmes complexes, le plus souvent à une échelle d'organisation territoriale. Elle offre l'intérêt de pouvoir mieux étudier les systèmes combinant des dynamiques naturelles et des dynamiques sociales, ce qui est le cas des systèmes d'élevage (Bah, Touré *et al.* 2006). Dumont et Hill montrent l'intérêt des modèles multi-agents pour apporter des réponses à des questions de comportements de groupes d'animaux, car ils permettent de représenter les conséquences d'interactions d'agents agissant en parallèle, ce qui va influencer l'ensemble du système (Dumont & Hill 2001) et insistent sur la possibilité d'explorer des situations difficiles à tester expérimentalement. Le modèle développé permet de simuler individuellement le déplacement d'animaux et d'évaluer ainsi l'effet de changements au niveau des capacités de l'animal ou de facteurs environnementaux ou de combinaisons des deux éléments (Dumont & Hill 2001). Certains auteurs qui développent de tels systèmes indiquent que les systèmes multi-agents sont « spécialement adaptés lorsqu'il s'agit de simuler le fonctionnement de systèmes composés par des agents hétérogènes qui interagissent et qui sont influencés par leur localisation dans l'espace au sein de situations qui peuvent être hors d'équilibre » (Janssen 2002; Bousquet 2006; Morales Grosskopf 2007). La plate-forme CORMAS est un exemple d'environnement de programmation destiné à l'élaboration de modèles multi-agents à des fins de simulation ; de nombreux modèles ont été développés et font l'objet de publications abondantes (Bonaudo, Bommel *et al.* 2005; Bousquet, Castella *et al.* 2007; Morales Grosskopf 2007). D'autres modèles multi-agents cherchent à représenter la gestion d'un troupeau allaitant (Ingrand, Dedieu *et al.* 2002), les flux de richesses au sein des exploitations du Kazakhstan (Milner-Gulland, Kerven *et al.* 2006), l'interaction entre troupeau et ressources herbagères (Baumont, Cohen-Salmon *et al.* 2004) ou encore les problèmes de remembrement (Mac Allister Gross 2005). Dans ce dernier modèle qui inclut l'échelle territoriale, l'entreprise pastorale est elle-même un agent du modèle.

3) Souvent une combinaison de plusieurs méthodes et techniques de modélisation

Même si un modèle est caractérisé de manière dominante par une méthode (simulation/optimisation) de modélisation et parfois une technique (déterministe, stochastique, mécaniste, empirique, etc.), il résulte le plus souvent d'une intégration de plusieurs d'entre elles, ce qui offre une représentation plus performante de la réalité et permet une analyse plus pertinente des systèmes complexes.

On retrouve ainsi trois principales associations dans les travaux :

- La simulation et l'optimisation ; c'est l'association la plus fréquente car elle permet de rendre compte du fonctionnement d'un système biotechnique par le biais de la simulation tout en représentant une composante décisionnelle grâce aux techniques d'optimisation. Dans ce type d'association, les différentes techniques de simulation peuvent être utilisées : la simulation empirique dans le cas d'évaluation de systèmes (e.g. durabilité économique et écologique) (Donnelly, Moore *et al.* 1997; Berntsen, Petersen *et al.* 2003; Castelan-Ortega, Fawcett *et al.* 2003; van Calster, Berntsen *et al.* 2004), la simulation déterministe pour des questions environnementales (Rotz, Satter *et al.* 1999; Cabrera, Breuer *et al.* 2005; Cabrera, Hildebrand *et al.* 2006) ou encore la simulation stochastique pour des problématiques relatives au troupeau (eg. Renouveau) (Pla, Conde *et al.* 1998; Yates & Rehman 1998; Nielsen, Groen *et al.* 2004). Dans la grande majorité des cas, c'est la programmation linéaire qui est utilisée comme technique d'optimisation pour représenter le comportement de l'éleveur.
- Les techniques déterministes et stochastiques : comme il a été évoqué dans la partie concernant les techniques de simulation, les modèles déterministes contiennent parfois des composantes stochastiques. C'est le cas du modèle de Pleasants *et al.* qui s'intéresse à l'aléa dans les systèmes de pâturage (Pleasants, Wake *et al.* 1997).
- Les approches empiriques et mécanistes : c'est une association évoquée dans le modèle « Livestock System Model » (LSM) qui simule l'impact de la nouvelle réforme PAC sur les systèmes bovins du Royaume Uni (Matthews, Wright *et al.* 2006) en associant une représentation fine de phénomènes biophysiques (cycles alimentaires, etc.) et de processus de gestion basés sur des données d'enquêtes et de suivi.

Ce recensement des différents concepts, méthodes et techniques de modélisation montre l'amplitude de la diversité que l'on peut rencontrer derrière la notion de modélisation des systèmes d'élevage. Ce sont ces divergences dans les approches qui vont offrir la possibilité de représenter le système d'élevage avec différents points de vue et avec plus ou moins de globalité, selon les objectifs propres des modélisateurs.

Deuxième partie : une grande variété de travaux de modélisation

Dans cette partie, nous nous intéressons à quelques aspects essentiels traités dans les travaux de modélisation dynamique des systèmes d'élevage. Ces enjeux touchent aussi bien les questions de temps et d'espace, que la représentation d'articulations au sein du système biotechnique, ou encore de la représentation de l'éleveur. En annexe 2, un tableau récapitule un certain nombre de modèles ayant abouti au développement d'un outil informatisé et délivre quelques unes de leurs caractéristiques clés.

I) Quels systèmes d'élevage?

1) L'importance du facteur géographique dans les représentations

1.1) Systèmes inscrits dans une logique économique de subsistance

Cette première catégorie comprend les systèmes d'élevage tels qu'il sont abordés pour des pays en voie de développement, notamment d'Afrique et d'Amérique du Sud, où les systèmes sont rarement spécialisés et sont souvent associés à une économie de subsistance, marquée essentiellement par l'agriculture vivrière et l'autoconsommation des productions. La représentation de ces systèmes dans les modèles est toujours marquée par une approche qui reste très globale et qui prend en compte un grand nombre de facteurs de production sociaux, politiques et environnementaux (Thornton, Galvin *et al.* 2003). Le fonctionnement du troupeau est en général assez simple et n'est pas l'enjeu de représentation principal de ces modèles ; on retrouve parfois plusieurs types d'animaux (Bernet, Ortiz *et al.* 2001; Herve, Genin *et al.* 2002; Bontkes & van Keulen 2003; Thornton, Galvin *et al.* 2003). Il s'agit plutôt d'étudier différentes stratégies de gestion du territoire (Herve, Genin *et al.* 2002) ou de ventes des animaux (Thornton, Galvin *et al.* 2003; Milner-Gulland, Kerven *et al.* 2006), dans le but de subvenir aux besoins du foyer agricole. Cette notion de foyer agricole apparaît dans ces modèles car elle constitue à la fois la main d'œuvre disponible pour exécuter les tâches (Herve, Genin *et al.* 2002; Pfister, Bader *et al.* 2005) mais c'est aussi l'entité consommatrice des ressources de l'exploitation (Bontkes & van Keulen 2003; Louhichi, Alary *et al.* 2004; Pfister, Bader *et al.* 2005). Pour ces systèmes, la question de l'aléa est majeure et l'introduction d'éléments stochastiques est récurrente (Thornton & Herrero 2001).

1.2) Systèmes inscrits dans une logique d'économie de marché

Ce sont les systèmes d'élevage de territoires où l'agriculture atteint un niveau d'intensification plus important et où le fonctionnement est mieux connu, car étudié depuis de nombreuses années. Par opposition au premier cas, les modèles représentant ces systèmes

n'offrent en général plus cette vision globale du système et ne prennent pas en compte autant d'enjeux externes. Ils sont focalisés sur un processus ou un phénomène particulier et ne rendent pas compte du fonctionnement de l'ensemble des composantes d'un système, ou en tout cas pas de manière homogène. L'angle d'attaque peut être porté du côté du fonctionnement du troupeau (Yates & Rehman 1998; Cournut 2001; Ingrand, Dedieu *et al.* 2002; Hary 2004; Ezanno 2005) ou de la gestion des surfaces ou du pâturage (Doyle, Boars *et al.* 1989; Cacho, Finlayson *et al.* 1995; Woodward, Wake *et al.* 1995; Topp & Doyle 1996; Topp & Doyle 1996; Mohtar, Zhai *et al.* 2000; Cros, Duru *et al.* 2001; Cros, Duru *et al.* 2004; Brereton, Holden *et al.* 2005) et il est rare de mettre au jour des modèles intégrant de manière équivalente différentes composantes du système, par exemple techniques, économiques, sociales, politiques et environnementales.

2) Pour quelles productions animales ?

La littérature offre une importante variété de production animales considérées dans les modèles. Cependant, parmi les modèles s'intéressant à des systèmes relativement spécialisés, on observe une dominance de modèles traitant de systèmes bovins allaitants (Baumont, Dumont *et al.* 2002; Ingrand, Dedieu *et al.* 2002; Teague & Foy 2002; Diaz-Solis, Kothmann *et al.* 2003; Nielsen, Kristensen *et al.* 2004; Romera, Morris *et al.* 2004; Costa & Rehman 2005; Kaine & Tozer 2005; Veysset, Bebin *et al.* 2005; Wolfova, Wolf *et al.* 2005; Crosson, O'Kiely *et al.* 2006; Villalba, Casaus *et al.* 2006) et de systèmes bovins laitiers (Woodward, Wake *et al.* 1995; Kristensen, Sorensen *et al.* 1997; Yates & Rehman 1998; Coleno & Duru 1999; Herrero, Fawcett *et al.* 1999; Rotz, Mertens *et al.* 1999; Cros, Duru *et al.* 2001; Coquil, Faverdin *et al.* 2004; Louhichi, Alary *et al.* 2004; Shalloo, Dillon *et al.* 2004; van Calker, Berentsen *et al.* 2004; Buysse, Van Huylbroeck *et al.* 2005; Cabrera, Breuer *et al.* 2005; Fitzgerald, Brereton *et al.* 2005; Garcia, Faverdin *et al.* 2005; Rotz, Zartman *et al.* 2005; Depigny 2007). Les systèmes ovins allaitants sont également largement représentés dans les modèles (Cacho, Finlayson *et al.* 1995; Donnelly, Moore *et al.* 1997; Lesnoff 2000; Cournut 2001; Beukes, Cowling *et al.* 2002; Finlayson, Betteridge *et al.* 2002; Milner-Gulland, Kerven *et al.* 2006).

Quelques modèles de systèmes d'élevage caprins ont également donné lieu à des publications : Guevara *et al.* se sont, par exemple, intéressés à la faisabilité économique d'une stratégie alimentaire avec une articulation autour de la réponse de performances de reproduction des chèvres (Guevara, Silva Colomer *et al.* 2003). Tseveenjav *et al.* ont simulé la réponse en terme de qualité de la laine dans les système mongols (Tseveenjav, Garrick *et al.* 2006).

Concernant les systèmes porcins, 2 synthèses bibliographiques mettent en lien les différents travaux de modélisation (Martel, Dedieu *et al.* 2006; Pla 2006). Un grand nombre des modèles évoqués peuvent être situés dans le cadre de la modélisation à l'échelle organisationnelle de l'exploitation agricole (Allen & Stewart 1983; Teffène & Salaun 1983; Pettigrew, Cornelius *et al.* 1986; Singh 1986; Teffène, Salaun *et al.* 1986; Pomar, Harris *et*

al. 1991; Jalvingh, Dijkhuizen *et al.* 1992; Jorgensen & Kristensen 1995; Pla, Conde *et al.* 1998; Stonehouse, Vos *et al.* 2002; Berntsen, Petersen *et al.* 2003; Lansink, Berg *et al.* 2003; Pla, Pomar *et al.* 2003). Quant aux systèmes hors sol de « granivores », l'exploration bibliographique réalisée n'a pas permis de découvrir de représentations explicitement situées à l'échelle de l'exploitation. Ces systèmes hors sol présentent quelques particularités, qui leur confèrent des enjeux assez spécifiques :

- L'échelle spatiale est uniquement représentée sous forme de nombre de places ou de surfaces dans un bâtiment mais la dimension parcellaire incluant de la diversité est inexistante, le lien au territoire est peu marqué ; Martel *et al.* énumèrent plusieurs modèles de systèmes porcins incluant la gestion de places disponibles dans les bâtiments (Allen & Stewart 1983; Teffène & Salaun 1983; Singh 1986; Teffène, Salaun *et al.* 1986; Jorgensen & Kristensen 1995).
- La dynamique de fonctionnement sur le long terme n'est pas traitée: la conduite en bandes, cyclique, n'apporte pas de dimension temporelle longue ; les liens entre bandes successives et les stratégies de gestion des bandes ne sont pas étudiés ; les travaux existants modélisent le plus souvent le fonctionnement d'une bande d'animaux, par exemple autour des thématiques de propagation de maladies chez les volailles, la gestion sanitaire étant l'un des facteurs les plus importants de la conduite de l'élevage.

II) Une interaction entre plusieurs composantes : comment situer les modèles et quelles articulations mises en jeu ?

1) Quelle est la place du troupeau dans la représentation du système?

Un certain nombre de modèles des systèmes d'élevage ne cherchent pas à représenter le fonctionnement ou la dynamique du troupeau, ce sont des modèles qui, dans la plupart des cas, prennent en compte son existence mais qui ne s'intéressent pas à sa composition et à son évolution dans le temps. Les enjeux de représentation peuvent être portés sur d'autres aspects, par exemple économiques dans le cas de modèles bio-économiques ou économétriques (Antle & Capalbo 2001; Guimaraes, Madalena *et al.* 2006) ou environnementaux (Guerrin 2001; Keating & McCown 2001). Certains modèles ont pour objet d'étude privilégié les surfaces et ne considèrent le troupeau qu'en tant que consommateur global de fourrages et fournisseur de productions animales (Mohtar, Zhai *et al.* 2000).

Dans les modèles où le troupeau est plus qu'une demande globale et où sa composition évolue dans le temps, on retrouve deux principales tendances :

- Le troupeau est composé de plusieurs catégories ou types d'animaux dont les effectifs vont varier pendant le temps de simulation. Le temps est dans ces

modèles discrétisés par les changements d'état notamment symbolisés par le passage d'un animal d'une catégorie à une autre. Quand les transitions d'un état à l'autre sont sous l'influence de règles probabilistes, on parle de l'utilisation de techniques de Markov (Martel, Dedieu *et al.* 2006). Ce type de modèle inclut les modèles démographiques à compartiments et concerne aussi bien les bovins laitiers (Coquil, Faverdin *et al.* 2004; Fitzgerald, Brereton *et al.* 2005; Depigny 2007), que les bovins allaitants (Kaine & Tozer 2005; Matthews, Wright *et al.* 2006) ou que les ovins (Cacho, Finlayson *et al.* 1995; Lesnoff 2000) et les caprins (Salinas, Ramirez *et al.* 1999; Guevara, Silva Colomer *et al.* 2003). Les représentations de dynamiques d'élevages porcins sont également souvent basées sur des changements d'états (Pla, Conde *et al.* 1998; Pla, Pomar *et al.* 2003; Martel, Dedieu *et al.* 2006).

- Les modèles sont dits individus-centrés lorsqu'ils mettent l'accent sur l'aspect individuel des animaux, ce qui autorise la prise en compte d'une diversité des individus. Les changements d'états (eg. physiologiques) peuvent alors être asynchrones, i.e. qu'un individu peut évoluer indépendamment des autres individus en fonction d'événements particuliers (Caswell & John 1992; Cournut 2001; Ingrand, Dedieu *et al.* 2002; Cournut & Dedieu 2004). Les techniques de simulations à événements discrets sont les plus rencontrées pour ce type de représentation (Martel, Dedieu *et al.* 2006). Dans cette approche on retrouve notamment des modèles ciblés sur les problématiques d'alimentation des animaux (Nielsen, Kristensen *et al.* 2004; Buysse, Van Huylenbroeck *et al.* 2005; Villalba, Casasus *et al.* 2006) ou sur les questions de renouvellement/réforme (Yates & Rehman 1998; Hary 2004; Nielsen, Kristensen *et al.* 2004). Certains auteurs vont encore plus loin dans cette prise en compte de la diversité des individus en ajoutant une dimension temporelle supplémentaire : le temps long induit par la notion de carrière animale ou de trajectoire productive (cette notion « qualifie (i) le trajet réalisé par une femelle dans l'enchaînement des sessions de reproduction organisé par l'éleveur et (ii) la succession des événements de production qui résulte des réponses biologiques de cette femelle » (Cournut 2001; Tichit, Ingrand *et al.* 2004)). Cette trajectoire étant considérée comme une composante essentielle dans la prise de décision des éleveurs (Tichit, Ingrand *et al.* 2004), le troupeau peut être représenté par une combinaison de trajectoires productives d'animaux (Landais & Bonnemaire 1996; Kristensen, Sorensen *et al.* 1997; Bernet, Ortiz *et al.* 2001; Cournut 2001; Cournut & Dedieu 2004). La figure 4 illustre cette combinaison de successions de « fonctions » individuelles.

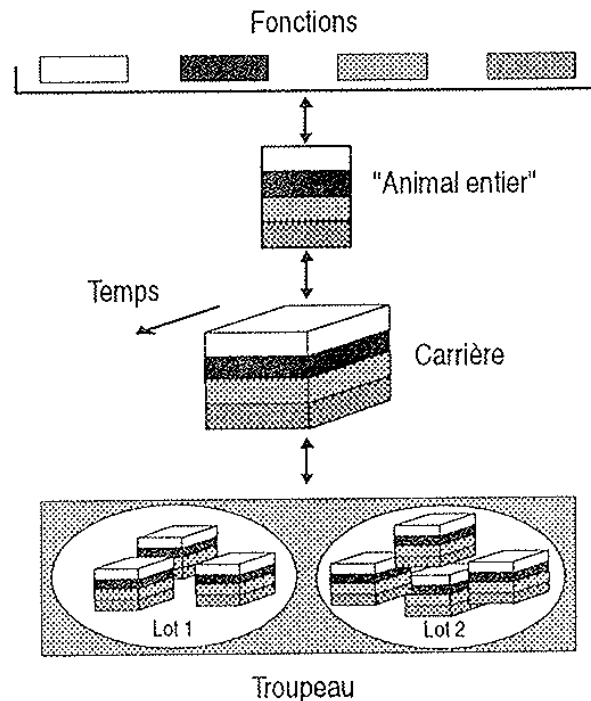


Figure 4 : la carrière animale, un objet essentiel pour construire une continuité conceptuelle entre les connaissances analytiques relatives aux fonctions physiologiques et les questions portant sur la gestion des troupeaux (Landais & Bonnemaire 1996)

2) Qu'en est-il du territoire : une réelle dimension spatiale?

On retrouve de manière plus ou moins explicite une composante territoriale dans les travaux de modélisation. La représentation de cette composante s'accompagne d'enjeux supplémentaires, notamment :

- Représenter la dimension spatiale et l'emboîtement d'échelles qui doit être croisé avec la dimension temporelle forcément présente dans un modèle ;
- Apporter des éléments de réponse à des questions scientifiques fortement reliées aux surfaces et à leur gestion ;
- Représenter des articulations cohérentes avec la composante « troupeau ».

2.1) La dimension spatiale et les changements d'échelles

Bon nombre d'auteurs mettent en avant la particularité du système d'élevage liée à l'importance de la dimension spatiale dans son fonctionnement (Milleville, Combes *et al.* 1982; Hubert & Girault 1988; Landais 1993; Deffontaines & Lardon 1994; Hubert 1994; Landais & Bonnemaire 1996).

Cependant, relativement peu de modèles font référence à des entités spatiales ou à l'importance de la spatialisation dans le processus de décision. Une réelle dimension spatiale est considérée dans les modèles multi-agents (voir première partie, 2.2) qui restent rares à l'échelle de l'exploitation agricole (Ingrand, Dedieu *et al.* 2002; Milner-Gulland,

Kerven *et al.* 2006). D'autres niveaux d'organisation comme celui de la prairie pâturée sont souvent représentés dans de tels modèles (Baumont, Dumont *et al.* 2002). La plate-forme Cormas permet de créer des modèles multi-agents en incorporant des entités spatiales relevant de plusieurs niveaux d'organisation (Bousquet, Bakam *et al.* 1998). La connexion avec un système d'information géographique (SIG) permet de rendre plus interactive cette spatialisation mais c'est une méthode qui reste peu employée dans le domaine des systèmes d'élevage. Le modèle de simulation déterministe de Depigny illustre l'utilisation d'un couplage avec un SIG. Dans les règles de fonctionnement du modèle axé sur le rôle des éleveurs dans le maintien des paysages, interviennent des notions de distances de parcelles par rapport au siège des exploitations, notamment dans la gestion de l'entretien des parcelles (Depigny 2007).

Peu d'entités spatiales présentent une réelle diversité. Seuls quelques travaux mentionnent une diversité à l'échelle des parcelles (Fitzgerald, Brereton *et al.* 2005; Jouven, Carrere *et al.* 2006; Jouven, Carrere *et al.* 2006) ou à l'échelle infra-parcellaire (Brereton, Holden *et al.* 2005; Fitzgerald, Brereton *et al.* 2005; Corson, Skinner *et al.* 2006; Jouven, Carrere *et al.* 2006; Jouven, Carrere *et al.* 2006). Mais dans tous les cas, la spatialisation des entités n'est pas réellement existante ; c'est pourquoi la prise en compte des distances relatives n'est pas mentionnée dans les règles de fonctionnement du système.

Concernant les échelles spatiales prises en compte dans les modèles, Girard précise que la plupart des travaux de modélisation entrepris ces dernières années sont focalisés sur des objets d'étude tels que la parcelle ou le lot d'animaux alors que les surfaces prises dans leur ensemble ne sont jamais considérées (Girard 1995). De nombreux modèles intègrent plusieurs échelles, soit au niveau des entités de gestion (entités sur lesquelles portent les règles de fonctionnement ou les équations) considérées, soit au niveau de l'objet d'étude du modèle. Li Pun *et al.* décrivent un certain nombre d'outils et de variables pour l'analyse des systèmes d'exploitation à différents niveaux d'organisation (Li Pun, Leon-Velarde *et al.* 1999).

La problématique des changements d'échelle est largement traitée dans les modèles traitant d'économie. Une grande partie de l'article de Weersink *et al.* aborde ces questions d'unités d'analyse (notamment spatiale) ; il est question du choix de modèles biophysiques et de méthodes d'agrégation pour réaliser des modèles économiques permettant de répondre à des questions d'extrapolation de résultats issues de décisions d'unités individuelles pour passer à l'échelle de l'analyse d'une politique publique (Weersink, Jeffrey *et al.* 2002). Beaucoup de travaux analytiques des systèmes d'élevage intègrent plusieurs niveaux de l'échelle locale, par exemple en combinant l'échelle parcellaire et l'échelle exploitation entière (Fromageot 2006). C'est le cas des modèles développés sur la problématique de gestion des effluents sur l'Île de la Réunion qui intègrent le niveau « exploitation agricole », échelle où ont lieu les processus de transfert de matières organiques sur les parcelles et l'échelle territoriale, siège de transferts d'effluents entre exploitations agricoles (Guerrin 2007).

2.2) Quelles questions sur le territoire?

(a) En terme de résistance des systèmes aux aléas

Certains modèles ont été élaborés afin d'évaluer l'impact de changements climatiques sur le fonctionnement des systèmes d'élevage (Parsons, Armstrong *et al.* 2001; Fitzgerald, Brereton *et al.* 2005). Le modèle Dairy_sim, valable uniquement dans le contexte régional de l'Irlande, représente une articulation entre un modèle de croissance d'herbe, un modèle de pâturage des animaux (stations de pâture) et un modèle de besoin alimentaire des animaux. C'est l'aléa météorologique introduit en entrée au sein de données qui va influencer la pousse de l'herbe et permettre de visualiser les impacts au niveau du fonctionnement de l'ensemble du système (Fitzgerald, Brereton *et al.* 2005).

Un travail de thèse a également débouché sur le développement d'un modèle traitant de l'utilisation des ressources fourragères en terme de résistance aux aléas climatiques, selon le degré de prise en compte de la diversité prairiale par l'éleveur dans ses décisions (Andrieu 2004; Andrieu, Poix *et al.* 2007).

(b) En terme de durabilité des systèmes

D'autres modèles, avec des perspectives plus larges, abordent les questions de durabilité écologique des exploitations, souvent reliées à des questions de durabilité économique (Donnelly, Moore *et al.* 1997; Freer, Moore *et al.* 1997; Moore, Donnelly *et al.* 1997; Beukes, Cowling *et al.* 2002; Donnelly, Freer *et al.* 2002; van Calker, Berentsen *et al.* 2004; Kaine & Tozer 2005). Le vaste programme GRAZPLAN qui met en lien plusieurs modules indépendants permet d'évaluer et d'optimiser les décisions de l'éleveur sur le long terme par rapport à ces notions de rentabilité et de durabilité (Donnelly, Moore *et al.* 1997; Freer, Moore *et al.* 1997; Moore, Donnelly *et al.* 1997; Donnelly, Freer *et al.* 2002). Dans la même optique, Kaine *et al.* ont développé un modèle de simulation beaucoup plus simple qui permet d'évaluer la stabilité, la résilience et la durabilité des systèmes (Kaine & Tozer 2005). Un autre modèle, DyNoFlo Dairy, qui articule les dimensions environnementale, économique et biophysique du système, permet d'évaluer le lessivage des nitrates et les résultats économiques en réponse à des paramètres environnementaux et des stratégies de gestion (Cabrera, Breuer *et al.* 2005; Cabrera, Hildebrand *et al.* 2006). Le modèle de Costa *et al.* traite de l'évolution de l'état des prairies sur le long terme (10 ans); au cours des simulations, les prairies sont soumises à des contraintes de dégradation, leur état étant caractérisé par la notion de « pasture productivity index », variant avec l'âge et les taux de chargement appliqués (Costa & Rehman 2005).

(c) En terme de diversité prairiale

Le modèle SEBIEN (Jouven 2006; Jouven, Carrere *et al.* 2006) simule le fonctionnement journalier d'exploitations définies en entrée par leurs caractéristiques structurelles et leur stratégie de conduite. Au cœur de ce modèle, la diversité parcellaire (en

terme de composition fonctionnelle en graminées) engendre une diversité de production de biomasse, de structure et de digestibilité du couvert à l'échelle de l'exploitation ; un sous modèle animal permet de calculer l'ingestion sélective des lots sur les parcelles et en retour les performances animales. En outre, les prairies réagissent en terme de biodiversité aux pratiques, notamment de fertilisation. Le modèle SPUR (Simulation of Production And Utilization of Rangelands) est également centré sur l'écosystème "prairie" : il permet de simuler le fonctionnement de la prairie et de prédire la réponse à des changements de paramètres ou de pratiques (Teague & Foy 2002; Corson, Skinner *et al.* 2006).

3) Quelles articulations entre troupeau et territoire ?

Trois formes d'articulations entre troupeau et territoire peuvent être identifiées dans la littérature :

- La représentation du cycle de l'azote et des flux de matières organiques ;
- La représentation des systèmes de pâtures ;
- La représentation du système fourrager.

(a) Prise en compte des déjections animales et du cycle de l'azote

C'est l'articulation la moins représentée dans les modèles. On retrouve cette question dans le modèle GRASIM (et les modèles qui reprennent ses fondements) qui traite de notions de balances et de cycles en azote et qui réduit le troupeau à des scénarii de gestion du pâturage (Mohtar, Zhai *et al.* 2000). En intégrant le modèle SPUR (Simulation of Production and Utilization of Rangelands) dans l'IFSM (Integrated Farm System Model), Corson *et al.* reprennent des notions de gestion des effluents à l'échelle de l'exploitation et simulent l'impact des pratiques sur la productivité des prairies et leur composition botanique (Corson, Skinner *et al.* 2006). Cependant, l'articulation est presque inexistante puisque le troupeau est réduit à des productions animales. Un autre travail de modélisation place la gestion des effluents comme objet central d'étude et permet de représenter et d'évaluer les pratiques de gestion des effluents à l'échelle de l'exploitation ; cette représentation est basée sur la gestion de flux de matières organiques sur lesquels agissent des contraintes d'ordre logistique (Guerrin 2001; Aubry, Paillat *et al.* 2006). Cette posture se distingue de la plupart des travaux de modélisation de la gestion des effluents d'élevage qui concernent la relation entre les pratiques et leurs impacts environnementaux (Guerrin 2007). Dans une optique similaire, Chardon *et al.* ont développé un modèle de simulation des flux d'éléments comme l'azote, le phosphore, le potassium, le cuivre et le zinc sur des dynamiques de long terme (Chardon, Rigolot *et al.* 2007).

(b) Des modèles focalisés sur le processus de pâture et les performances zootechniques

⇒ *Modélisation du comportement de l'animal au pâturage*

Certains modèles mécanistes se focalisent sur le processus de pâturage. Baumont *et al.* prennent en compte l'architecture du couvert et la décision animale (Baumont, Cohen-Salmon *et al.* 2004) ; le point de vue adopté privilégie la représentation de l'animal, c'est-à-dire que la pousse de l'herbe n'est pas modélisée, elle est simplement prise en compte. L'animal est décrit par plusieurs variables et il est doté de la capacité à prendre des décisions concernant son alimentation, ce qui agit sur les processus d'ingestion. Dans cette catégorie de modèles, on peut citer les travaux de Brereton *et al.* qui, à partir d'une matrice de transition définissant des règles de changements, simule le déplacement des animaux sur une grille spatiale représentant le système prairial (Brereton, Holden *et al.* 2005). Dans cet exemple la pousse de l'herbe est modélisée de manière plus précise et est représentée par plusieurs variables qui créent une diversité spatiale du couvert perçue par les animaux. Les règles de décision animales reprennent plusieurs concepts issus des travaux de Baumont *et al.* (Baumont, Cohen-Salmon *et al.* 2004).

Une autre tentative de modélisation de ce comportement animal au pâturage admet que l'ingestion est fonction des caractéristiques animales, des caractéristiques du couvert et de variables de comportement de l'animal (Rook & Yarrow 2002). Ce modèle incorpore en outre des données expérimentales (mesures au pâturage).

⇒ *Modélisation de la gestion du pâturage*

Dans la catégorie des modèles de gestion du pâturage en rotation, plusieurs approches ont été développées. Le modèle de Woodward *et al.*, qui est un modèle d'optimisation, vise à maximiser l'ingestion dans un contexte où l'herbe est en croissance limitée (Woodward, Wake *et al.* 1995). Un autre modèle s'intéresse à la résilience d'un système de prairies pâturées piloté (Anderies, Janssen *et al.* 2002). Meot *et al.* ont utilisé le concept des « saisons pratiques » (Bellon, Girard *et al.* 1999) qui correspond à un découpage de la campagne en périodes définies par des ressources fourragères comparables (Meot, Hubert *et al.* 2003). Le modèle conceptuel qui est décrit vise à mettre en évidence les règles d'organisation stratégique de l'éleveur et d'adaptation au changement, il est ainsi destiné à représenter et à étudier plus particulièrement le processus décisionnel de l'éleveur. Il permet de lier la représentation de la gestion des productions animales avec la dynamique du couvert végétal à l'échelle de l'exploitation agricole.

D'autres travaux mettent l'accent sur l'impact de stratégies de pâturage sur les performances des animaux et du troupeau. C'est le cas du binôme Simherd/Simcow qui, par une simulation mécaniste et stochastique, évalue l'effet de différentes intensités de pâturage sur les performances laitières des vaches (Kristensen, Sorensen *et al.* 1997). Pour les systèmes ovins, les stratégies de gestion peuvent être explorées dans des modèles qui prennent en compte la pousse de l'herbe, le processus de pâturage et les réponses biologiques des animaux (Cacho, Finlayson *et al.* 1995; Finlayson, Betteridge *et al.* 2002; McAllister, Gross *et al.* 2005)

(c) Des modèles élargissant de gestion du système fourrager dans sa globalité

Au delà du processus de pâturage, certains modèles vont plus loin dans la représentation de l'articulation troupeau/territoire et prennent en compte l'ensemble du système fourrager.

Autour de l'adéquation entre besoins du troupeau et calendrier d'alimentation, on retrouve un certain nombre de modèles d'optimisation. Certains modèles permettent l'optimisation (i) des rations par le biais de bilans azotés, phosphoriques et énergétiques (Buisse, Van Huylbroeck *et al.* 2005; McAllister, Gross *et al.* 2005; Crosson, O'Kiely *et al.* 2006) (ii) de la gestion des stocks de fourrages et (iii) de la gestion du pâturage en rotation sur paddocks (Buisse, Van Huylbroeck *et al.* 2005).

Des modèles de simulation déterministes représentent également une articulation autour du calendrier d'alimentation du troupeau : certains simulent des stratégies de gestion du système fourrager (Coleno & Duru 1999), d'autres, des stratégies de gestion des stocks (Diaz-Solis, Kothmann *et al.* 2003; Diaz-Solis, Kothmann *et al.* 2006) et enfin certains des stratégies de gestion de l'allocation des aliments aux animaux (Rotz, Mertens *et al.* 1999; Rotz, Satter *et al.* 1999). Le modèle Sepatou permet de simuler l'application d'une stratégie de conduite du pâturage tournant et plus généralement de gestion de alimentation (maïs ensilé, concentré, foin) d'un troupeau de vaches laitières (Cros, Duru *et al.* 2001; Cros, Duru *et al.* 2004). Dans ce modèle, la représentation du processus de décision de l'agriculteur est relativement développée (cf. troisième partie).

4) Et l'homme ?

A propos des modèles d'entreprises des autres secteurs que le secteur agricole, Kirikova relevait un défaut majeur qui est le manque de prise en compte de l'action humaine dans le système surtout lorsque l'on souhaite répondre à des besoins de gestion (Kirikova 2000; Guerrin 2007). Peut-on détecter une évolution vers des modèles d'entreprises agricoles qui laissent plus de place dans la représentation aux acteurs concernés (Attonaty, Chatelin *et al.* 1990) ? La représentation explicite de l'activité humaine est indispensable pour l'aide à la gestion de systèmes de production agricoles (Thornton & Herrero 2001; Garcia, Faverdin *et al.* 2005). Dans les différents schémas conceptuels présentés dans la première partie pour définir le système d'élevage, il est question d'un pôle en articulation avec les autres, appelé tantôt le pôle « éleveur », tantôt le « pôle décisionnel » ou « pôle de gestion » agissant sur un système biotechnique. Dans ce chapitre, nous traiterons les dimensions du système d'élevage directement reliés à l'éleveur et à son rôle dans le fonctionnement du système. Le processus décisionnel, occulté dans ce chapitre, fera l'objet d'une étude plus approfondie dans la troisième partie de ce document.

4.1) Dans les aspects économiques

L'étude des interactions entre composantes de production et composantes économiques dans les systèmes d'exploitation est une thématique présente dans les travaux de modélisation. Plusieurs degrés de prise en compte des aspects économiques coexistent dans la littérature et sont souvent en lien avec la méthode de modélisation utilisée. Il paraît adéquat de différencier :

- Des modèles d'optimisation incluant une approche de type LMP (Linear Mathematical Programming) qui permettent de résoudre des problèmes de maximisation ou de minimisation d'une fonction mathématique linéaire appelée la fonction objectif (Louhichi, Alary *et al.* 2004). Cette fonction peut admettre plusieurs logiques : maximiser la valeur de l'actif relative au cheptel (Costa & Rehman 2005), maximiser la production (Rotz, Mertens *et al.* 1999; Rotz, Satter *et al.* 1999; Crosson, O'Kiely *et al.* 2006) ou les profits (Janssen, Anderies *et al.* 2004; Cabrera, Breuer *et al.* 2005) en réduisant les coûts, ou encore la marge brute (Yates & Rehman 1998; Veysset, Bebin *et al.* 2005) ou minimiser le coût énergétique (Buysse, Van Huylbroeck *et al.* 2005). Plusieurs auteurs soulignent un inconvénient majeur de l'approche par LMP qui est sa non-flexibilité (ne permet pas d'accepter des changements mineurs) et son incapacité à reproduire fidèlement la réalité et à représenter une stratégie (Louhichi, Alary *et al.* 2004).
- Des modèles de simulation qui vont permettre soit uniquement de prendre en compte le contexte économique ou social pour déterminer des objectifs de production (Lansink, Berg *et al.* 2003; Rewe, Indetie *et al.* 2006) et ainsi orienter le fonctionnement du système, soit de réellement articuler un modèle économique avec un modèle biotechnique de production. C'est le cas du modèle de Antle *et al.* qui permet de simuler l'impact de l'évolution de prix sur l'utilisation de l'espace (Antle & Capalbo 2001). En offrant une réelle représentation des décisions et notamment des décisions d'assolement, ce modèle simule la dynamique spatiale de l'utilisation du sol, ce qui n'est pas permis par les techniques d'optimisation. D'autres modèles permettent de d'évaluer l'efficacité économique de différentes stratégies et scénarios de gestion ou de différents systèmes de production (Rotz, Zartman *et al.* 2005; Wolfova, Wolf *et al.* 2005; Wolfova, Wolf *et al.* 2005; Guimaraes, Madalena *et al.* 2006; Matthews, Wright *et al.* 2006), parfois en évaluant des impacts écologiques (Thornton, Galvin *et al.* 2003; Rotz, Zartman *et al.* 2005) ; la plupart de ces modèles utilisent des méthodes déterministes à quelques exceptions près, citons l'exemple du Moorepark Dairy Systems Model (MDSM) (Shalloo, Dillon *et al.* 2004; Shalloo, Dillon *et al.* 2004) qui utilise des techniques stochastiques issues du « stochastic budgeting » pour comparer

l'efficacité biologique et économique de la production laitière sur des sols de différents types en fonction de variations du contexte économique.

4.2) ...et d'organisation du travail...

Selon Cros *et al.*, « si étudier un processus de production est le principal objectif, alors la prise de décision des activités humaines et les processus de travail peuvent être inclus de manière utile dans un modèle englobant du système de production » (Cros, Duru *et al.* 2003). Seul le cas du modèle conceptuel Atelage (Madelrieux 2004) offre une entrée par le volet organisation du travail dans les exploitations d'élevage, au sens division technique (tâches) et division sociale (affectation aux travailleurs et coordination). Atelage est une représentation (description et qualification) de l'organisation du travail sur une campagne agricole complète avec l'intégration de différentes échelles de temps et de régulations liées à des aléas. Il permet de décrire l'organisation du travail par séquences et d'identifier les facteurs et déterminants de l'évolution de l'organisation du travail sur la campagne d'une part entre séquences organisationnelles (évolution sur l'année du processus de production, évolution des combinaisons d'activités, évolution sur l'année de la main d'œuvre) et d'autre part au sein de ces séquences (aléas, fluctuation de main d'œuvre, rythme hebdomadaire de certaines tâches, etc.). Dans cette représentation, le reste du système d'élevage est réduit à des combinaisons d'activités engendrant la mobilisation de main d'œuvre puisque l'objectif du modèle est bien de qualifier l'organisation du travail. Ce cadre de description de l'organisation du travail semble laisser de côté « l'interdépendance des opérations concrètement réalisées par l'exploitant et des flux biophysiques, les uns étant à la fois causes et conséquences des autres » (Guerrin 2007).

Très peu de modèles implémentés offrent une réelle représentation de l'organisation du travail au sein du système d'élevage. La prise en compte la plus simple est une représentation en sortie par un coût, surtout présente dans les modèles traitant de performances économiques des systèmes (Guimaraes, Madalena *et al.* 2006). Dans d'autres modèles, le travail est exprimé sous formes de sorties non économiques, par exemple sous la forme de besoins en main d'œuvre (le plus souvent exprimé en temps de travail) ; le modèle de Rotz et Zartman, qui cherche à démontrer la faisabilité d'une nouvelle logique de production dans les systèmes de production laitier de Pennsylvanie (Rotz, Zartman *et al.* 2005) ou les modèles de la plate-forme LSM (Livestock System Model) basée sur le concept de diagrammes d'état permettent d'obtenir de telles sorties.

Dans d'autres cas, le travail intervient en entrée et est représenté soit sous forme de paramètres, soit sous forme de variables. On retrouve une notion de ressource de main d'œuvre introduite en entrée dans certains modèles d'aide à la décision où la gestion de la production est soumise à une disponibilité de main d'œuvre (Pfister, Bader *et al.* 2005; Veysset, Bebin *et al.* 2005; Vayssieres, Lecomte *et al.* 2007). Cette contrainte de main d'œuvre est également prise en compte dans le modèle d'optimisation des systèmes de production allaitant irlandais (Crosson, O'Kiely *et al.* 2006). Des modèles d'optimisation

évoquent également des contraintes de travail ; OptINRA fait intervenir le travail sous forme d'une ressource mobilisée sans grande articulation avec le reste du système puisqu'elle ne présente pas de variation de disponibilité (Veysset, Bebin *et al.* 2005). Louhichi *et al.* introduisent une notion de compétition en main d'œuvre (Louhichi, Alary *et al.* 2004) dans un modèle d'optimisation.

Quelques rares modèles simulent réellement quelques aspects de l'organisation du travail. Un modèle de fonctionnement de système de production des Andes utilise une entrée par activité qui entraîne la consommation de temps de travail. Chaque tâche est prioritairement affecté à une catégorie de travailleurs, et les surfaces sur lesquelles sont classées par priorité et par type d'intervention selon les périodes de l'année (Herve, Genin *et al.* 2002). C'est un des seuls modèles de simulation où l'organisation du travail est représentée de manière explicite, l'articulation étant réalisée par les activités consommatrices de temps et une variabilité intra-annuelle des priorités par rapport à la main d'œuvre et aux activités.

Le modèle de Castelan Ortega intègre une saisonnalité de la disponibilité en main d'œuvre qui correspond à introduire en entrée un calendrier de la main d'œuvre avec des variations intra-annuelles. Ce système d'aide à la décision concerne une zone particulière du Mexique, la vallée de Toluca (Castelan-Ortega, Fawcett *et al.* 2003). La notion d'activité et de priorités entre activités en compétition est abordée dans le formalisme développé par Aubry *et al.* (Aubry, Paillat *et al.* 2006) ou encore dans le modèle développé par Salinas *et al.* (Salinas, Ramirez *et al.* 1999).

III) Quelles particularités du système d'élevage prises en compte dans les modèles ?

1) Les questions de temporalité

1.1) La caractéristique pluriannuelle du système d'élevage et la prise en compte du passé

Peu de modèles mettent en évidence le caractère pluriannuel du fonctionnement du système d'élevage, c'est-à-dire que les résultats d'une année dépendent en partie de ceux d'une année précédente (Louhichi, Alary *et al.* 2004). Cette notion de gestion pluriannuelle est très rarement abordée dans les travaux de modélisation car elle fait appel à des mécanismes complexes qui ne sont pas toujours très bien connus et les résultats de simulation sur le long terme sont peu faciles à appréhender.

Les modèles traitant de la faisabilité de nouvelles stratégies de conduite sont en général basés sur des simulations sur le long terme mais ils n'expriment pas clairement une articulation entre les années successives, mis à part la réutilisation des résultats de la simulation d'une année pour la simulation de l'année suivante. C'est notamment le cas de certains modèles d'optimisation qui incluent une composante économique ; celui développé par Rotz *et al.* permet de simuler sur 25 ans (avec des données climatiques réelles issues de

relevés d'une station) le fonctionnement d'un système bovin laitier (Rotz, Zartman *et al.* 2005). Le modèle de Costa *et al.* offre des simulations sur 10 ans sur le fonctionnement de systèmes bovins allaitant du Brésil central (Costa & Rehman 2005). Là encore, le climat est le seul paramètre évolutif car il procure des alternances en terme de périodes sèches et humides qui imposent des régimes de contraintes différents.

Pour les modèles intégrant des aspects socio-économiques, le lien transversal peut être constitué de variables d'entrée qui évoluent sur le long terme : c'est le cas du modèle de simulation des dynamiques de développement agricole au Mali qui reproduit une simulation sur 45 ans avec un calibrage fait sur une période de 16 ans reprenant l'évolution de nombreux paramètres économiques (Bontkes & van Keulen 2003) ou pour le modèle bio-économique de Wolfova qui s'intéresse à la dynamique des troupeaux bovins allaitants sur le long terme (Wolfova, Wolf *et al.* 2005; Wolfova, Wolf *et al.* 2005). SPUR (Simulation of Production and Utilization of Rangelands) intègre une dimension supplémentaire liée à l'évaluation d'impacts environnementaux d'un système allaitant qui implique une prise en compte de variables pluriannuelles comme des données de populations d'insectes et de faune sauvage et intègre également des années climatiques réelles (Teague & Foy 2002). Un modèle de simulation de l'évolution des caractéristiques des sols offre également cette visée pluriannuelle (Keating, Carberry *et al.* 2003).

C'est dans les modèles intégrant explicitement une représentation du processus décisionnel (cf. troisième partie) que l'articulation entre les différentes années est prise en compte, notamment par l'utilisation de stratégies de gestion qui impliquent une double échelle annuelle et pluriannuelle d'une part (pour tout ce qui concerne la planification stratégique comme les décisions d'assolement), et saisonnière d'autre part (séquences où un lot d'animaux est sur une parcelle). Cette double échelle évoquée dans les travaux de Sheath et Clark (Sheath & Clark 1996) est reprise dans les travaux de conceptualisation de Duru et Hubert (Duru & Hubert 2003) qui parlent d'une « time-based decision structure », ce qui situe l'articulation pluriannuelle autour des décisions stratégiques.

L'importance du temps long est considérable dans les différentes composantes du système d'élevage. Peu de modèles prennent en compte la carrière productive des animaux et des études montrent que la série d'événements productifs est un facteur significatif sur le niveau de production et les réponses de survie. Dedieu et Cournut abordent dans ce sens une gestion particulière du système où le vieillissement et la succession des performances des animaux interviennent dans leurs performances actuelles. La prise en compte de l'histoire productive des animaux est selon Cournut *et al.* un élément très important dans la gestion d'un système de production et qui a un impact sur les décisions de l'agriculteur, notamment pour les questions de gestion du renouvellement du troupeau (Cournut 2001; Cournut & Dedieu 2004).

1.2) Pas de temps et superposition d'échelles temporelles

Le temps est un élément central dans l'analyse des systèmes d'élevage : la nécessité de prendre en compte des évolutions impose de donner une dimension temporelle à toute représentation du système d'élevage. Plusieurs approches temporelles coexistent : vision linéaire du temps, vision calendaire (système vu comme une superposition de différents calendriers), échelle linéaire du temps (temps long) vs échelle cyclique (temps rond), double indexation du système par rapport au temps (Landais 1987; Bonnemaire & Raichon 1989; Vissac 1993; Landais & Bonnemaire 1996).

Girard précise que les « pratiques ne prennent leur sens que situées dans le temps (le temps historique, le temps de leur mise en œuvre, mais aussi leur durée) et l'espace » (Girard 1995). De même, donner la priorité au temps signifie dans la plupart des cas laisser de côté l'organisation spatiale alors que cette question est primordiale en élevage (Girard, Bellon *et al.* 2001). C'est la problématique du croisement spatio-temporel dans les modèles de fonctionnement des systèmes d'élevage. La question du changement d'échelle spatiale, bien que souvent abordée dans les travaux de représentation systémique des activités agricoles est peu marquée dans les approches de modélisation. Or comme le souligne Fromageot, il existe une articulation forte entre échelle spatiale et échelle temporelle et il n'y a pas forcément de relation linéaire entre les changements d'échelle spatiales et les temporalités propres à chacune de ces échelles. En étendant l'échelle d'étude, les temporalités mises en cause ne sont pas forcément augmentées dans les mêmes proportions (Fromageot 2006).

Cette question des changements d'échelle temporelles reste majeure dans les travaux de modélisation des systèmes d'élevage, comme le soulèvent Stoorvogel *et al.* pour un modèle d'analyse de compromis entre des indicateurs économiques et environnementaux des systèmes d'exploitation (Stoorvogel, Antle *et al.* 2004). Ce modèle fait appel à une série de modèles biophysiques et économétriques pour représenter différents processus biophysiques et la prise de décision de l'agriculteur. Pour lier ces modèles, des échelles de temps spatiales et temporelles compatibles doivent être utilisées. Stoorvogel *et al.* citent l'exemple de la combinaison entre un modèle de lixiviation des résidus de pesticides à pas de temps journalier avec un modèle économique à pas de temps saisonnier. Pour pallier ce problème d'unités d'analyse différentes, des procédures d'agrégation/désagrégation peuvent être utilisées (Hansen & Jones 2000; Stoorvogel & Antle 2001; Stoorvogel, Antle *et al.* 2004).

La plupart des modèles d'analyse à l'échelle de l'exploitation agricole traitent d'une échelle temporelle annuelle, c'est à dire que les résultats sont issus du fonctionnement d'une exploitation pour une année représentative (Weersink, Jeffrey *et al.* 2002). Dans certains cas, il est nécessaire d'adopter une représentation plus dynamique de la prise de décision à l'échelle de l'exploitation et le temps doit être incorporé de manière explicite dans l'analyse. Weersink *et al.* soulignent que le temps peut être découpé en multiples périodes de prise de

décision, ce qui revient à adopter une visée pluri-annuelle et il peut également être pertinent de découper ces périodes (par exemple, découper les années en mois). Cela permet d'avoir des effets sur le long terme mais aussi de voir l'effet du « timing » des opérations sur l'année.

Le pas de temps dans les modèles implémentés est très souvent mentionné mais très rarement justifié. Crosson *et al.* justifient brièvement un pas de temps mensuel en indiquant que la nature saisonnière des systèmes d'élevage contraint à choisir des données mensuelles (Crosson *et al.* 2006).

2) La diversité des entités biophysiques

La diversité naturelle est une particularité que l'on retrouve à toutes les échelles et dans de nombreux composants d'un système de production agricole. Elle entre en jeu dans la variabilité des réponses biologiques et intervient de manière forte dans le processus décisionnel des agriculteurs. La diversité des entités animales et végétales à différentes échelles est la plus représentée.

2.1) Diversité des entités animales

C'est la diversité des animaux qui est la plus évoquée dans l'ensemble des travaux de modélisation. Cette diversité animale est liée au comportement biologique ou réponse biologique à une stratégie par exemple nutritionnelle (Cournut 2001; Cournut & Dedieu 2004). Cette réponse biologique est un phénomène complexe de telle sorte que la réponse de cause à effet d'un animal moyen (le plus courant dans les modèles déterministes) a de grandes chances d'être différente de la réponse moyenne obtenue si l'on considère un lot d'animaux (Oldham & Emmans 1990; Villalba, Casasus *et al.* 2006). Cela implique de prendre en compte une diversité au sein des animaux d'un même lot et l'effet de groupe.

Si l'on traite d'animaux d'une même catégorie, la diversité des individus peut être prise en compte de différentes façons :

- Par des éléments fixes, des caractéristiques intrinsèques d'animaux tels que des indicateurs génétiques (Teague & Foy 2002; Cannas, Tedeschi *et al.* 2004) qui sont le plus souvent des données d'entrée du modèle ;
- Par des éléments dynamiques comme l'âge (Cannas, Tedeschi *et al.* 2004; Louhichi, Alary *et al.* 2004), le numéro de lactation (Herrero, Fawcett *et al.* 1999; Kristensen 2003) ou des notions plus englobantes comme le potentiel de production laitière (Herrero, Fawcett *et al.* 1999; Kristensen 2003; Louhichi, Alary *et al.* 2004). La diversité des poids, bien que prise en compte de manière assez systématique pour exprimer la diversité des besoins physiologiques ou nutritionnels est rarement mentionnée : on la retrouve dans certains modèles déterministes (Herrero, Fawcett *et al.* 2000; Herrero, Fawcett *et al.* 2000; Finlayson, Betteridge *et al.* 2002; Wolfova, Wolf *et al.*

2005; Wolfova, Wolf *et al.* 2005). Enfin, certains modèles s'intéressent à la diversité des réponses biologiques par rapport à l'état corporel des animaux (Pomar, Harris *et al.* 1991; Donnelly, Moore *et al.* 1997; Ezanno 2005).

- Par des éléments dynamiques et l'historique de leur évolution au cours du temps. La diversité des trajectoires productives (cf. II, 1) est parfois mentionnée comme étant essentielle pour caractériser la diversité des réponses biologiques (Cournut 2001; Kristensen 2003; Cournut & Dedieu 2004).

2.2) Diversité des entités relatives au territoire

Dans certains modèles, ce sont des caractéristiques fixes d'entités qui permettent d'exprimer la diversité. Les caractéristiques pédologiques de parcelles données en entrée permettent par exemple de prendre en compte une diversité d'entités spatiales (Carberry, Hochman *et al.* 2002; Keating, Carberry *et al.* 2003).

La diversité des entités est néanmoins le plus souvent dynamique, c'est-à-dire qu'elle évoluera dans le temps en interconnexion avec le reste du système. La diversité du couvert végétal d'une prairie peut être représentée par la variation de diversité floristique ou de composition botanique à l'échelle infraparcellaire (Brereton, Holden *et al.* 2005; Corson, Skinner *et al.* 2006). Dans le cas du modèle de Brereton *et al.* qui permet d'étudier la dynamique spatiale et temporelle du processus de pâturage, la diversité verticale (différentes hauteurs d'herbe) et horizontale (variation de la composition floristique) du couvert végétal des parcelles va guider le comportement des animaux dans leurs décisions de pâturage. Le modèle Sebien quant à lui, traite de la diversité des prairies, d'où des parcelles décrites selon 4 types fonctionnels définis par un degré de fertilité et une composition fonctionnelle de graminées (Jouven 2006; Jouven, Carrere *et al.* 2006; Jouven, Carrere *et al.* 2006). Cette diversité parcellaire est aussi prise en compte dans le modèle empirique de Fitzgerald *et al.* qui simule la pousse de l'herbe en fonction de données climatiques et de stratégies de fertilisation (Fitzgerald, Brereton *et al.* 2005).

3) La représentation d'aléas

Le système de production agricole est, de par son interconnexion avec des phénomènes naturels, soumis à l'aléa. L'agriculteur doit sans cesse adapter le processus de production à ces différents types d'aléas (aléa climatique, réussite à l'insémination, etc.) pour tenter d'atteindre un objectif de production qu'il s'est fixé.

Représenter l'aléa est un enjeu important dans les modèles car cela offre la possibilité de représenter des phénomènes naturels qui caractérisent le système réel (Villalba, Casasus *et al.* 2006). Thornton *et al.* le définissent comme une composante majeure pour les systèmes de pays en voie de développement : « l'occurrence d'événements aléatoires peut avoir d'énormes implications pour un foyer agricole » (Thornton & Herrero 2001). Pleasants *et al.* montrent l'intérêt d'intégrer des composantes

stochastiques aux modèles et indiquent qu' « avec un modèle (purement) déterministe, certains aspects des processus naturels sont ignorés » et que ces aspects ont un impact non négligeable sur la stabilité et la durabilité des systèmes (Pleasants, Wake *et al.* 1997).

L'un des aléas les plus souvent pris en compte (surtout dans les modèles qui intègrent une dynamique végétale) est l'aléa climatique, qui est un facteur non maîtrisé par l'homme. Harrington *et al.* repris par Teague *et al.* indiquent que « les forces climatiques contrôlent l'écosystème pour une bien plus grande part que ne le fait la gestion en elle-même » (Teague & Foy 2002). Le climat peut avoir différents impacts sur le système : il affecte les rendements de productions végétales (Louhichi, Alary *et al.* 2004) en ayant une incidence directe sur la pousse de l'herbe (Cros, Duru *et al.* 2001; Meot, Hubert *et al.* 2003; Cros, Duru *et al.* 2004; Fitzgerald, Brereton *et al.* 2005; Kaine & Tozer 2005; Rotz, Zartman *et al.* 2005; Jouven, Carrere *et al.* 2006) mais il est également cité comme ayant un impact sur l'organisation du travail et le déroulement des chantiers (Madelrieux 2004; Aubry, Paillat *et al.* 2006; Madelrieux, Dedieu *et al.* 2006). L'aléa climatique est, en général, intégré dans des données climatiques réelles, représentant des données d'entrée du modèle, alors que se développent certains algorithmes génétiques permettant de générer de l'aléa climatique (Janssen, Anderies *et al.* 2004). Les composantes climatiques prises en compte sont en général les précipitations, les températures (températures moyennes ou sommes de températures) et le rayonnement solaire (Cros, Duru *et al.* 2001; Cros, Duru *et al.* 2004; Jouven, Carrere *et al.* 2006).

Un grand nombre de paramètres essentiels associés aux animaux peuvent être considérés comme stochastiques parce qu'ils possèdent une composante aléatoire. Pour représenter ces composantes aléatoires, les modèles utilisent, soit des méthodes de Monte-Carlo, soit des chaînes de Markov (Villalba, Casasus *et al.* 2006). Pleasants *et al.* ont mis en oeuvre des équations différentielles stochastiques pour modéliser l'influence d'un grand nombre de facteurs inconnus sur le fonctionnement d'un système pâturé (Pleasants, Wake *et al.* 1997). Les modèles rendent compte des aléas suivants :

- L'aléa de mortalité des animaux ; il est notamment question de la mortalité des jeunes individus dans un module spécifique, Lambalive au sein du programme GRAZPLAN. Ce module permet de prendre en compte la mortalité des agneaux sur des critères d'état corporel et de gain moyen quotidien (Donnelly, Moore *et al.* 1997; Freer, Moore *et al.* 1997; Moore, Donnelly *et al.* 1997). Veysset *et al.* considèrent l'aléa de mortalité des veaux (Veysset, Bebin *et al.* 2005) ;
- L'aléa de réforme involontaire qui englobe un aléa de mortalité et d'autres facteurs a été mentionné dans différents travaux (Kristensen, Sorensen *et al.* 1997; Cournut 2001; Nielsen, Kristensen *et al.* 2004) ;
- L'aléa lié à la reproduction ; il peut inclure un aléa de détection des chaleurs (Kristensen, Sorensen *et al.* 1997), un aléa de durée de gestation (Ingrand,

Cournut *et al.* 2003; Agabriel & Ingrand 2004) ou encore un aléa de réussite aux inséminations (Donnelly, Moore *et al.* 1997; Wolfova, Wolf *et al.* 2005; Matthews, Wright *et al.* 2006). Dans ce dernier cas, plusieurs facteurs sont évoqués comme des facteurs de poids ou d'état corporel (Donnelly, Moore *et al.* 1997; Wolfova, Wolf *et al.* 2005) mais aussi des facteurs temporels comme la période de réalisation (Jalvingh, Dijkhuizen *et al.* 1992; Donnelly, Moore *et al.* 1997) ou des facteurs historiques comme la trajectoire productive (Cournut 2001).

Les modèles économétriques ou bio-économiques mentionnent le caractère aléatoire de la fluctuation des prix des intrants et des productions agricoles, animales et végétales (Antle & Capalbo 2001; Louhichi, Alary *et al.* 2004). Enfin, Brereton *et al.* mettent en avant un aléa de distribution spatiale des animaux au sein des parcelles (Brereton, Holden *et al.* 2005).

A plusieurs reprises, nous avons été amenés à évoquer l'importance du pôle « éleveur » présenté dans le schéma tripolaire de la première partie. Dans la partie qui suit, nous nous focaliserons sur un aspect où il tient une place prépondérante, le processus de décision. Quelle place occupe-t-il dans les modèles de systèmes d'élevage ? Comment est-il représenté ou pris en compte ?

Troisième partie : le processus de décision dans les travaux de modélisation

Aujourd'hui de plus en plus au centre des préoccupations de modélisation, la composante décisionnelle liée à la gestion du système d'élevage par l'éleveur est abordée sous différents angles d'attaque. Au début des années 1990, plusieurs auteurs s'intéressent à la modélisation de la prise de décision et aux conséquences sur le fonctionnement des systèmes de production agricole (Attonaty, Chatelin *et al.* 1990; Attonaty & Soler 1994; Edward-Jones & McGregor 1994; Morales Grosskopf 2007). Dans les travaux récents, même si la plupart des modèles mettant en jeu la décision la résumant à un ensemble de règles, certains travaux mettent l'accent sur la formalisation de ce processus (Cournut 2001; Cournut & Dedieu 2004). Le processus décisionnel peut être caractérisé par plusieurs éléments qui jettent les bases du plan de cette partie :

- L'existence de plusieurs niveaux d'entités de gestion, soit plusieurs niveaux de gestion ;
- Le lien entre l'expression d'un projet de production et une combinaison de règles, c'est le caractère cohérent des décisions qui est souligné ;
- Des procédures d'ajustement du système de gestion, soulignant le caractère adaptatif du processus de décision de l'éleveur et une articulation importante avec le système biotechnique.

L'enjeu est maintenant de voir comment les différentes approches de modélisation traitent ces points essentiels.

I) Quelles entités de gestion ?

1) Entités de gestion : éléments utilisés par les agriculteurs dans leur processus de décision ?

Lorsqu'un modèle inclut une composante de gestion ou de décision qui rend compte d'un comportement d'éleveurs, la définition d'entités de gestion qui sont les entités sur lesquelles portent les décisions est une étape obligatoire. Dans un système d'élevage, les entités de gestion sont des éléments qui sont réfléchis et manipulés par les agriculteurs pour organiser leur production et ajuster leurs décisions (Cournut & Dedieu 2004). Ces entités se construisent à tous les niveaux du processus décisionnel (pilotage stratégique, opérationnel ou gestion de la production) (Aubry, Papy *et al.* 1998; Fountas, Wulfsohn *et al.* 2006) et prennent en compte l'hétérogénéité spatiale, temporelle (susceptibles d'évoluer au cours du temps) et la diversité naturelle (Cournut 2001; Girard, Bellon *et al.* 2001).

Dans cette définition intervient la notion d' « entités utilisées par les éleveurs » mais les entités utilisés dans les modèles ne sont parfois pas réellement manipulées par les éleveurs mais ce sont des concepts destinés à représenter la gestion du système. On peut

citer le concept de « paddock bank » utilisé dans le modèle de Romera *et al.* qui rend compte de la manière dont les éleveurs gèrent les surfaces disponibles pour la pâture mais qui n'est pas réellement issu du discours de l'éleveur (Romera, Morris *et al.* 2004; Romera, Morris *et al.* 2005) ; il en est de même pour le Cycle de Production de Lot proposé par Cournut *et al.* (Cournut 2001). Coléno et Girard parleront d'ensembles fonctionnels ou d' « unités de gestion autonomes réellement utilisés par les agriculteurs dans la conduite quotidienne mais aussi coordonnées au cours du temps » (Girard 1995; Coléno 2002) afin d' « assurer l'adéquation entre la gestion quotidienne et les objectifs » de l'agriculteur.

Coléno propose un cadre d'analyse de ces unités de gestion en établissant un parallèle avec le domaine de la gestion de production industrielle et définit le système de production par :

- Des entités qui sont des ressources utilisées pour l'activité de production ;
- Des tâches qui sont les opérations constitutives de l'élaboration de la production (par exemple une intervention technique) ;
- Des process de production (par exemple la culture du maïs ensilage).

Pour animer ce système, l'agriculteur mobilise des « savoirs-faire » qui vont permettre de décider des tâches à effectuer, les ordonner et choisir les modalités et des « savoirs-comprendre » mettant en relation ces tâches avec l'objectif de production assigné.

2) La prise en compte de plusieurs niveaux de gestion

2.1) Représentation des niveaux décisionnels

La représentation du niveau décisionnel du projet d'élevage n'est pas présente dans la littérature. Seul le modèle de Lansink *et al.* s'intéresse de manière conceptuelle et empirique aux facteurs qui vont conditionner les projets des éleveurs de porcs des Pays Bas dans un futur proche. Ainsi sont distingués 3 types de facteurs (caractéristiques de l'éleveur, caractéristiques de l'exploitation et facteurs externes reliés notamment à la politique économique et sociale) qui peuvent agir sur le processus de décision des éleveurs (Lansink, Berg *et al.* 2003). Mais il n'est pas question du fonctionnement du système dans ce modèle en réponse à ces projets d'éleveurs. Selon Thornton *et al.*, la focalisation s'est faite sur la gestion de composants biophysiques sans réellement s'intéresser aux objectifs et aux projets des agriculteurs qui conduisent à adopter leur stratégie de gestion (Thornton & Herrero 2001). Un large apport a été fait dans ce sens de la part des sciences sociales, que l'on retrouve dans l'article de Solano *et al.* dont les travaux incluent des méthodes participatives pour l'acquisition de données et utilisent des méthodes analytiques capables de traiter des variables quantitatives et qualitatives rendant compte des objectifs des agriculteurs et de l'organisation de leurs décisions de gestion (Solano, Leon *et al.* 2001; Solano, Leon *et al.* 2001; Thornton & Herrero 2001). De même, on ne retrouve que très

rarement le lien existant entre l'expression d'un projet de production et une combinaison de règles de gestion dans les modèles (Cournut & Dedieu 2004).

Selon Jalvingh *et al.*, les décisions évoquées dans les modèles relèvent plutôt de l'aide à la décision tactique et opérationnelle et il n'est pas opportun d'évoquer les mots « strategy » ou « policy » que l'on retrouve souvent dans les intitulés des modèles (Jalvingh, Arendonk *et al.* 1993; Jalvingh, Arendonk *et al.* 1993). Morales ajoute qu'il est nécessaire de décrire les décisions stratégiques, ie. celles qui ne sont pas associées au cycle annuel (Morales Grosskopf 2007).

En faisant référence au domaine des productions végétales où la connaissance est relativement développée pour les itinéraires techniques et les modèles d'élaboration du rendement, certains auteurs mettent au centre des préoccupations la formalisation de ce qui constitue le pilotage stratégique de la production agricole (Aubry, Papy *et al.* 1998; Coleno & Duru 1999). Cournut *et al.* précisent que les différents niveaux décisionnels (projet, pilotage stratégique et opérationnel) se réfèrent tant à la gestion de l'entreprise agricole qu'à la gestion de la production agricole et s'inspirent des travaux relatifs à la gestion dans les productions végétales (Cournut 2001; Cournut & Dedieu 2004). Ainsi, le processus de décision se structure de la façon suivante :

- Un projet d'élevage qui inclut le projet de production (reproduction et commercialisation) et le projet de composition du troupeau ;
- Le pilotage stratégique qui est le lien entre projet d'élevage et pilotage opérationnel (définition, planification et ajustement des interventions au quotidien).
- Le pilotage opérationnel

La représentation de l'articulation entre les différents niveaux décisionnels reste « un lieu d'interrogations scientifiques actuellement fortes » (Aubry 2007).

2.2) La question des entités de gestion relatives...

(a) ...au troupeau

En 2003, Ingrand *et al.* soulignent l'importance d'entités de gestion de la production intermédiaires comme les lots d'animaux (Ingrand, Cournut *et al.* 2003; Dedieu, Cournut *et al.* 2006). Pour répondre à cette attente, ces auteurs identifient trois collectifs d'animaux correspondant à des lots réellement constitués ou non, et qui sont le support de décision relatives à la production, au renouvellement et aux ventes : le troupeau des reproductrices, les cohortes de jeunes mâles et de jeunes femelles, le stock de vaches de réforme. D'autres entités d'un niveau de gestion supérieur peuvent intervenir, ce sont par exemple : (i) les cycles de production de lots (Cournut 2001; Cournut & Dedieu 2004) qui constituent l'entité collective animale centrale du pilotage stratégique de la production et du renouvellement du troupeau de femelles reproductrices, (ii) les lots fonctionnels qui forment des ensembles

renouvelés de femelles reproductrices et (iii) les ateliers qui rendent compte de la dimension commerciale du projet de production. Appliquée aux systèmes bovins allaitants, cette superposition de niveaux de gestion permet de distinguer des lots physiques basés sur des interactions sociales et une entité supérieure qui est le cycle de reproduction (Ingrand, Dedieu *et al.* 2002; Ingrand, Cournut *et al.* 2003).

Seuls quelques modèles, notamment pour l'aide à la décision considèrent des entités de gestion supérieures à celle de l'animal. C'est le cas des modèles qui manipulent des lots d'animaux basés sur le stade biologique ou leur âge ou encore leurs besoins alimentaires. Ces entités peuvent évoluer au cours du temps (Castelan-Ortega, Fawcett *et al.* 2003) ou sont fixées au départ (Fitzgerald, Brereton *et al.* 2005; Pfister, Bader *et al.* 2005).

(b) ...aux surfaces

L'entité parcelle est souvent utilisée surtout dans le cas de modèles traitant de l'utilisation de l'espace ; c'est le cas du modèle empirique d'Antle *et al.* qui simule l'impact du contexte économique sur l'utilisation de l'espace (Antle & Capalbo 2001). L'entité parcelle est alors la cible des décisions d'assolement représentées de manière discrètes. C'est également cette entité parcellaire qui peut être utilisée pour des décisions relatives à la gestion du système fourrager (Mohtar, Zhai *et al.* 2000).

D'autres modèles ajoutent des entités différentes ; Thornton *et al.* utilisent le concept de « Tropical Pasture Units » qui permet de caractériser les objectifs des foyers agricoles et se situe ainsi au cœur des règles de décision (Thornton, Galvin *et al.* 2003). Ces entités symbolisent une entité spatiale quantifiée mais non délimitée dans la réalité des savanes nord tanzaniennes.

Dans un autre contexte, Bellon *et al.* repris par Meot *et al.* définissent des saisons-pratiques qui sont des entités temporelles pendant lesquelles l'éleveur vise à fournir un même niveau d'alimentation pour un lot spécifique d'animaux (Bellon, Girard *et al.* 1999; Meot, Hubert *et al.* 2003). Ce concept permet de lier la représentation de la gestion des productions animales avec la dynamique du couvert végétal à l'échelle de l'exploitation. Ces saisons pratiques sont caractérisées par i) leur période d'utilisation prévue, les modalités de pâturage et les effets sur la dynamique végétales et ii) leur utilisation effective. Des entités spatiales différentes de la parcelle sont également utilisées et basées sur des faciès de végétation homogènes. Ces entités sont les unités de gestion du pâturage (Meot, Hubert *et al.* 2003).

D'autres auteurs identifient un niveau de gestion supérieur particulier qui est l'atelier de production, défini de telle sorte que peuvent être identifiées des règles de décision qui ont pour fonction de coordonner entre eux et dans le temps ces ateliers de production (Coleno & Duru 1999; Coléno 2002). Pour prendre l'exemple du pilotage de la production fourragère, lors d'une phase de planification, l'éleveur fixe les objectifs propres à chacun des ateliers et affecte à chacun d'eux un certain nombre de ressources pour les atteindre. Plusieurs

rendez-vous de pilotages sont également programmés afin d'adapter cette planification à l'aléa et visent à des arbitrages d'affectation parcellaire. La planification porte donc sur deux paramètres : le dimensionnement des surfaces à allouer aux différents ateliers de production en fonction de choix stratégiques et la gestion du calendrier alimentaire, en particulier pendant les phases de transition alimentaire (Coléno 2002). L'atelier de production se définit par la conjonction de tâches et des savoirs mobilisés par l'agriculteur en vue de conduire un processus biotechnique. Ces ateliers sont des activités qui sont finalisées et qui n'ont d'existence que par la présence d'objectifs de production.

II) Comment sont représentés les décisions ?

Sebillotte et Soler abordent le processus de décision avec différents cadres d'analyse : ce sont des processus rationalisés, inscrits dans une durée et qui ont un caractère anticipatif (prise en compte d'un aléa) (Sébillotte & Soler 1990).

Pour Osty et Landais, repris par Girard, les décisions des agriculteurs sont fonctions de normes et d'informations, en cohérence avec des objectifs et des projets. Dans ce schéma décisionnel, les pratiques des agriculteurs représentent l'interface entre un sous-système opérant et un sous système décisionnel (Osty 1978; Girard 1995).

Il est important d'identifier l'enjeu de représenter le processus décisionnel dans les modèles. Clancey, cité par Guerrin évoque que « si la finalité ultime des modèles, en tant qu'outils d'interprétation, est bien d'aider aux processus de décision de gestionnaires humains, il ne s'agit pas pour autant de représenter le processus décisionnel lui-même, ni les processus cognitifs à l'œuvre chez les individus qui y participent ». Cette limite dans la représentation du processus de décision introduit la distinction que l'on peut retrouver entre « représenter » un processus décisionnel et en « rendre compte » (Clancey 2002; Guerrin 2007). C'est bien cette dernière terminologie qui paraît la plus appropriée dans la plupart des travaux de modélisation.

1) Par une définition de scénarios ou d'ensembles de règles de décision...

C'est une approche couramment utilisée dans les modèles qui évoquent la décision de l'éleveur : la décision est représentée de manière implicite dans des règles de fonctionnement qui n'intègrent qu'un niveau de décision, le niveau de gestion opérationnel dans la plupart des cas. Cela revient à employer des règles de décision qui spécifient des actions en fonction de l'apparition d'évènements ou en fonction de conditions particulières (Cros, Duru *et al.* 2003).

En général, dans les modèles de simulation pour l'aide à la décision, l'agriculteur est représenté par un module spécifique souvent appelé module de gestion et qui permet de définir la stratégie de gestion choisie pour la simulation avec plus ou moins de marges de manœuvre. C'est notamment le cas pour les modèles GRASIM (Mohtar, Zhai *et al.* 2000) et SPUR (Teague & Foy 2002) qui permettent d'élaborer des scénarios de gestion du pâturage

basés sur différents critères de durée ou d'état des parcelles. Pour la plate-forme APSIM, le « manager module » permet de choisir des règles de décisions caractérisant le scénario à simuler (Carberry, Hochman *et al.* 2002; Keating, Carberry *et al.* 2003). Le modèle de simulation empirique Dairy_sim comporte également un module de gestion qui permet de choisir la stratégie de fertilisation et les stratégies de gestion du système fourrager pour l'exploitation entière et comportant des règles de décision surtout basées sur des seuils (Fitzgerald, Brereton *et al.* 2005). Enfin, Janssen *et al.* utilisent un module management comportant un objectif de gestion, un ensemble de contraintes dynamiques et un ensemble de contrôles de faisabilité (Janssen 2002).

D'autres modèles permettent de définir en entrée différentes stratégies d'alimentation (Kristensen 2003; Matthews, Wright *et al.* 2006; Villalba, Casasus *et al.* 2006) ou de gestion du pâturage (Cacho, Finlayson *et al.* 1995; Woodward, Wake *et al.* 1995; Herrero, Fawcett *et al.* 2000; Herrero, Fawcett *et al.* 2000) ou de vente et de consommation des productions (Pfister, Bader *et al.* 2005), souvent représentés par des jeux de paramètres et de variables. Arapey de Morales *et al.* qui définit trois scénarios correspondant à la stratégie financière et de pâturage des éleveurs de l'Uruguay : les conservateurs, les intermédiaires et les enthousiastes (Morales Grosskopf 2007).

Même si ces modèles permettent de tester différents scénarii et différents choix tactiques et opérationnels, le contexte structurel de l'exploitation et la stratégie de l'exploitant sont en général stables pendant la simulation et reflètent un système de production particulier (Guerrin 2001; Buysse, Van Huylenbroeck *et al.* 2005).

La construction des règles de décision est peu explicitée dans les publications. Citons Romera *et al.* qui accordent une place importante aux méthodes d'élaboration des corps de règles de décision (Romera, Morris *et al.* 2004; Romera, Morris *et al.* 2005). Les règles sont constituées de conditions et d'actions, les conditions pouvant être des attributs d'entités de gestion, la situation, la date ou des variables de décision ou des associations de ces éléments.

2) ...ou par une réelle formalisation du processus de décision

2.1) Autour du modèle d'action

Le formalisme le plus repris pour représenter le processus de décision dans le système d'élevage reste le concept de modèle d'action proposé par Sébillotte et Soler à la fin des années 80 (Sébillotte & Soler 1990), lui même basé sur des travaux antérieurs ayant abouti à la définition du « modèle général » (Duru, Papy *et al.* 1988; Sébillotte & Soler 1988). Ces travaux représentent la première tentative de caractérisation de la stratégie de gestion de l'agriculteur pour les activités techniques (Cros, Duru *et al.* 2001). Ce cadre d'analyse de la décision des agriculteurs définit trois niveaux décisionnels :

- Un ou plusieurs objectifs généraux qui orientent la prise de décision technique de l'agriculteur ;
- un programme prévisionnel des actions à entreprendre, c'est la planification des décisions à prendre ;
- un corps de règles qui définit les étapes du programme, les opérations à mettre en œuvre et les moyens de construire des solutions de rechange si le déroulement envisagé ne peut s'effectuer (pilotage).

Cette approche a été utilisée dans les modèles de gestion de productions végétales (Aubry, Papy *et al.* 1998; Bellon, Lescourret *et al.* 2001; Dounias, Aubry *et al.* 2002), notamment pour montrer la diversité des itinéraires techniques utilisés par les agriculteurs (Coléno 2002). Il est aussi repris différentes récents travaux de modélisation des systèmes d'élevage articulant processus de décision et processus biotechnique ; le modèle d'action est notamment cité dans le modèle déterministe de gestion du système fourrager développé par Coléno et Duru (Coléno & Duru 1999; Coléno 2002) où différentes stratégies de gestion du pâturage sont représentées, dans la réflexion menée autour de la gestion du pâturage (Duru & Hubert 2003), dans le modèle MAGMA pour la gestion des effluents à l'échelle de l'exploitation (Aubry, Paillat *et al.* 2006) ou encore dans la problématique du rôle de la composante végétale dans la décision de l'éleveur (Meot, Hubert *et al.* 2003). Le modèle SEPATOU, qui permet de rendre compte de plusieurs stratégies de gestion du pâturage réutilise ce concept de modèle d'action en incluant deux niveaux de décision : un planning temporel (planification) et un générateur d'actions exécutables (action) (Cros, Duru *et al.* 2001; Cros, Duru *et al.* 2004). Un récent travail de thèse applique le modèle d'action à l'échelle de l'exploitation agricole, considérant à la fois les productions animales et végétales (Vayssieres, Lecomte *et al.* 2007). Ce modèle inclut des variables descriptives d'opérations techniques qui sont gérés par des règles de décision.

Enfin, avec une approche voisine de ce concept de modèle d'action, le modèle SEBIEN focalisé sur l'interaction troupeau-ressources limite la représentation de l'éleveur à un jeu d'objectifs et de pratiques. La décision est représentée sous forme d'une composante stratégique (planification) et une composante tactique (pilotage). La conduite est représentée par une planification de l'usage des parcelles et des objectifs de production animale, et des règles de pilotage qui gèrent au jour le jour la fauche, le pâturage et la complémentation des animaux (Jouven 2006; Jouven, Carrere *et al.* 2006; Jouven, Carrere *et al.* 2006).

2.2) Autres cadres de représentation

Un cadre de représentation de l'articulation entre les processus décisionnel et les processus biophysiques est proposé dans le concept de modèle hiérarchique (Martin-Clouaire & Rellier 2005). Dans cette approche, un module manager représentant l'agriculteur « décide » les actions à réaliser en fonction d'un plan nominal fourni en entrée du modèle, d'événements perçus, de contraintes d'éligibilité et de règles d'adaptation. Un système

opérant alloue les ressources nécessaires et exécute les actions préconisées par le manager. Ces actions agissent sur le système biophysique. Comme dans le cadre du modèle d'action, le pilotage stratégique du système est assuré par une sorte de « programme d'action préétabli manuellement et spécifiant comment doivent être planifiées les activités de conduite (Martin-Clouaire & Rellier 2003). Melodie est un exemple de modèle basé sur cette ontologie ; il comprend un module décisionnel composé d'un sous-modèle de planification et un sous-modèle de gestion opérationnelle (Chardon, Rigolot *et al.* 2007).

Un autre cadre de représentation de la stratégie des exploitations introduit par Mintzberg apparaît dans certains travaux conceptuels mais ne semble pas avoir fait l'objet d'implémentations. Cette approche considère que les stratégies délibérées des acteurs se combinent à des stratégies émergentes pour produire des stratégies réalisées (Mintzberg 1978; Martinet 1990; Mintzberg 1994; Koenig 1996; Attonaty, Chatelin *et al.* 1999; Gouttenoire 2007).

2.3) La prépondérance du temps

La question de l'échelle et du pas de temps mis en jeu est essentielle : Duru et Hubert reprennent ainsi une structure décisionnelle basée sur le temps (Sheat & Clark 1996) qui combine échelle annuelle et pluriannuelle (planification stratégique) et saisonnière (séquence pendant une campagne) (Duru & Hubert 2003). Tous les modèles basés sur le modèle d'action appliquent ce principe de double échelle temporelle (planification/action) dans les décisions. Antle *et al.* définissent le processus de décision comme une séquence de décisions discrètes et continues (Antle & Capalbo 2001), d'où une dimension temporelle clairement identifiée.

D'autres auteurs appliquent une structure décisionnelle basée sur 3 échelles de temps. C'est le cas du modèle d'analyse des décisions relatives aux systèmes bovins laitier développé par Louhichi *et al.* qui intègre trois types de décisions définies par leur portée temporelle (Louhichi, Alary *et al.* 2004) :

- Des décisions saisonnières concernant l'approvisionnement en ressources alimentaires pour les animaux, les interventions sur les parcelles, etc. ;
- Des décisions annuelles surtout relatives aux emprunts ;
- Des décisions sur le long terme concernant les investissements notamment en bâtiments ou en matériels.

Dans la même optique d'une distinction des décisions basée sur les pas de temps mis en jeu, Jalvingh *et al.* repris par d'autres auteurs distinguent 3 familles de décisions (Jalvingh, Arendonk *et al.* 1993; Fountas, Wulfsohn *et al.* 2006; Vayssieres, Lecomte *et al.* 2007). Ces 3 niveaux décisionnels sont :

- le niveau stratégique pluriannuel (long terme) ;
- le niveau tactique limité à l'échelle de la campagne (moyen terme) ;

- le niveau opérationnel quotidien (court terme).

Selon Vayssières *et al.*, on retrouve également une opposition faite entre décisions structurelles et décisions techniques, les décisions structurelles étant des décisions stratégiques représentant les choix de production et l'allocation de ressources productives alors que les décisions techniques sont les décisions prises pour gérer les système de production (Papy & Mousset 1992). La plupart des travaux ne considèrent que les décisions de portée opérationnelle et celles du niveau technique, cas du modèle de Vayssières *et al.* (Vayssières, Lecomte *et al.* 2007).

L'approche par les cohérences temporelles a été formalisée et mise en œuvre pour traiter de stratégies d'alimentation (Girard 1995; Moulin, Girard *et al.* 2001), de reproduction (Cournut 2001) et d'organisation du travail (Madelrieux 2004; Madelrieux, Dedieu *et al.* 2006). Pacaud *et al.* ont mis l'accent sur la prépondérance du temps en représentant la dynamique du système par le biais d'intervalles temporels (Pacaud, Cournut *et al.* 2007). L'intérêt de l'utilisation des relations qualitatives temporelles d'Allen (Allen 1983) est souligné dans plusieurs travaux qui précisent que ces approches temporelles permettent de simuler des activités complexes nécessitant la coordination d'actions diverses (Girard 1995; Guerrin 2007; Pacaud, Cournut *et al.* 2007).

2.4) L'expression d'une cohérence des décisions

La cohérence des décisions est une caractéristique du processus de décision qu'il est difficile de représenter. La plupart du temps, la cohérence décisionnelle est définie en entrée par l'utilisateur du modèle qui choisit la stratégie suivie (Aubry, Paillat *et al.* 2006). Dans d'autres cas, une certaine cohérence est présente par le biais d'une hiérarchie d'objectifs qui va ordonner différents corps de règles (Thornton, Galvin *et al.* 2003).

Girard et Hubert estiment que la plupart des modèles ont une représentation des décisions peu élaborée, certes avec une cohérence des décisions mais qui ne sont pas forcément le reflet des processus décisionnels engagés par l'éleveur (Girard & Hubert 1999). De même, Cournut souligne que les règles de décisions ne sont pas significatives de la conception de la gestion du troupeau faite par l'éleveur, et qu'elles ne rendent pas compte de manière évidente de différents niveaux décisionnels mis en jeu dans le pilotage de la production et de leur cohérence (Cournut 2001).

III) Une articulation avec le système biotechnique très peu étudiée

L'un des schémas conceptuels de la première partie présentait le système d'élevage comme une articulation entre un système décisionnel et un système biophysique. Comment cette articulation est-elle explicitée dans les publications ?

1) Adaptation de la décision et flux

Le caractère adaptatif des agriculteurs a été proposé par Petit (Petit 1981) et repris par Sebillotte *et al.* (Sebillotte & Soler 1990) où il est décrit un double processus d'adaptation, adaptation du projet de l'agriculteur à la situation et inversement. Cette capacité d'adaptation permanente a été également abordée par Landais lorsqu'une tentative de couplage entre un modèle d'action décisionnel et un modèle biotechnique de performance du troupeau a été réalisée (Landais 1992). Cette association des deux sous-modèles a amené à caractériser une articulation particulière associant des flux d'information qui remontent depuis le processus de production et agissent sur le processus décisionnel et dans l'autre sens des pratiques issues de processus décisionnels et agissant sur le système biotechnique. Ces deux flux sont caractérisés dans certains modèles ; celui de Vayssières *et al.* décrit des flux d'action (dirigés par les agriculteurs) et des flux biophysiques (issus des phénomènes naturels). Les actions des agriculteurs (pratiques) représentent le lien matériel et conceptuel entre les processus de décision et leur contrôle sur les phénomènes biophysiques (Vayssières, Lecomte *et al.* 2007).

Dans le modèle général ou modèle de comportement de l'agriculteur qui prend en compte 3 niveaux dans le processus de décision, Sébillotte et Soler évoquent le caractère récursif des processus décisionnels (Sebillotte & Soler 1990) notamment lorsque l'écart entre ce qui est visé et ce qui est réalisé est trop important. « l'impossibilité répétée de trouver une solution à l'un des niveaux conduira à remettre en cause le niveau supérieur ». C'est le niveau de la décision stratégique qui est le plus affecté par l'évolution constante des combinaisons d'enjeux internes et externes auxquelles sont soumis les agriculteurs (Aubry, Papy *et al.* 1998; Coleno & Duru 1999).

Certains travaux contribuent à l'enrichissement de ces cadres de représentation du comportement décisionnel de l'éleveur. Citons les très récents travaux de Magne concernant la formalisation du processus de mobilisation de ressources informationnelles chez les éleveurs bovins allaitants : dans ce modèle mental, l'éleveur est un acteur qui n'est pas réduit à traiter de l'information ; les sources d'information et les manières utilisées pour traiter cette information vont se traduire par des processus décisionnels de différentes natures (Magne, Cerf *et al.* 2007).

2) Quelles adaptations prises en compte dans les modèles ?

Dans le cas des systèmes de production traditionnels de pays en voie de développement, Hervé *et al.* soulignent que certaines variables structurelles peuvent changer de manière drastique d'un année sur l'autre et, souvent à cause de conditions climatiques extrêmes et variables, peuvent varier au sein même d'une campagne. Dans ce contexte, l'opportunité et l'adaptabilité sont des concepts clés dans la gestion de ces exploitations et constituent ainsi des points critiques dans l'analyse de ces systèmes (Herve, Genin *et al.* 2002).

Selon Cournut, les travaux de modélisation impliquant des règles de décision n'accordent que peu de place au flux retour d'information qui va conditionner le caractère adaptatif des processus décisionnels de l'éleveur (Cournut 2001).

Les travaux relatifs au modèle Sepatou qui décrivent une articulation entre la prise de décision dépendante d'une stratégie et la réponse d'un système biophysique contrôlé sont les plus explicites sur la représentation du caractère adaptatif des décisions : les règles de planification et d'action vont agir sur certaines variables qui, modifiées, vont influencer l'activation ou la désactivation de règles pour le pas de temps suivant. Ces processus vont notamment modifier les priorités des actions par rapport aux conditions climatiques (Cros, Duru *et al.* 2001; Cros, Duru *et al.* 2004). Cette caractéristique de Sepatou est soulignée par Guerrin qui indique que la plupart des modèles fonctionnent avec des règles spécifiées *ex ante* et qui ne semblent pas être modifiées en cours de simulation (Guerrin 2007). Le cadre de représentation de Martin-Clouaire et Rellier inclut des règles d'adaptation qui agissent sur le module manager (Martin-Clouaire & Rellier 2005), une stratégie n'est donc plus considéré simplement comme une séquence d'activités complètement spécifiée à l'avance. C'est ainsi que Melodie, modèle basé sur ce cadre de représentation inclut des possibilités d'adaptation du plan d'activités généré par le sous-modèle de planification, au moins concernant la gestion des épandages de matière organique (Chardon, Rigolot *et al.* 2007).

D'autres modèles offrent des adaptations stratégiques ou tactiques quand certains seuils sont atteints. Ces adaptations peuvent concerner les stratégies de rotation sur le pâturage (Kaine & Tozer 2005) ou les stratégies de complémentation au pâturage (Fitzgerald, Brereton *et al.* 2005). Janssen *et al.* ont cherché à représenter l'adaptation des décisions selon les politiques mises en œuvre, cela grâce à un modèle « adaptative-agent », qui permet des évolutions du comportement des agents en fonction de changements structurels irréversibles (Janssen, Walker *et al.* 2000).

Le travail de Bontkes *et al.* s'intéresse au caractère intuitif (insight) des éleveurs du Mali et cherche à représenter leur comportement en prenant en compte les expériences passés. Des stratégies d'adaptation ont été définies et elles concernent notamment les stratégies de vente des animaux qui peuvent s'adapter selon les besoins du foyer agricole et les prélèvements autorisés par les pouvoirs publics dans le cas d'une extension trop rapide de la taille des structures d'élevage.

Conclusion

Même si, pendant plusieurs décennies, un grand nombre d'études ont été menées pour développer des modèles destinés à l'amélioration de performances techniques ou économiques, d'autres enjeux se sont dessinés, notamment celui de prendre en compte l'éleveur, ses objectifs et les raisons qui font qu'il a une gestion particulière de son système (Vayssieres, Lecomte *et al.* 2007). Aujourd'hui, plus que les aspects de production et la volonté d'avoir des modèles plus précis et plus réalistes, l'enjeu est de mettre au jour de nouveaux moyens d'atteindre la pertinence pour rendre compte de la prise de décision et des pratiques de gestion des systèmes d'exploitation (Keating & McCown 2001). Ces nouveaux enjeux scientifiques amènent à développer des cadres d'analyse intégrant un maximum de ces préoccupations et cette revue a permis d'identifier et de caractériser un certain nombre d'approches.

Ainsi, la mise en perspective des travaux de modélisation des systèmes d'élevage ne doit pas être réduite à des comparaisons de méthodes (e.g. simulation vs optimisation) ou techniques (e.g. déterministes vs stochastiques) mais doit permettre d'identifier les points de vue adoptés sur le système, eux mêmes à mettre en relation avec les finalités (décision / compréhension) et les objectifs scientifiques. On observe notamment un dualisme important entre (i) approches mono-point de vue où l'on ne prend en compte qu'un problème étroit (un aspect de la conduite du système) et (ii) approches plus globales lorsque l'on souhaite représenter le système dans sa globalité avec une précision faible, en général assez éloignées des considérations opérationnelles (Martin-Clouaire & Rellier 2003; Guerrin 2007).

La multiplicité des travaux ces dernières années a permis des avancées considérables dans les représentations en de nombreux points ; néanmoins, il convient de s'interroger sur quelques points importants mis en évidence dans cette synthèse bibliographique et sur lesquels des efforts semblent se dessiner :

- la prise en compte du temps long et plus généralement, la superposition de différentes échelles de temps, déjà relevée par Landais en 1992 qui soulignait le manque d'approches intégrant le facteur temporel, les effets long terme et la notion de carrière animale (Landais 1992). Les modèles prenant en compte l'effet historique dans le fonctionnement du système sont encore peu nombreux et les cadres temporels adoptés sont rarement justifiés ;
- la représentation du processus décisionnel à l'échelle globale de l'exploitation agricole intégrant plusieurs niveaux de gestion ; jusqu'à présent, la plupart des travaux de représentation de la décision sont focalisés sur des processus particuliers comme la gestion du système fourrager et on assiste à une montée en puissance de modèles affichant des visions plus globale (Rotz, Mertens *et al.* 1999; Rotz, Taube *et al.* 2005; Pacaud, Cournut *et al.* 2007; Vayssieres, Lecomte *et al.* 2007).

- La représentation de l'organisation du travail paraît être un enjeu important et est surtout l'objet central de travaux conceptuels (Madelrieux, Dedieu *et al.* 2006). Dans les modèles implémentés, seules les composantes main d'œuvre et matérielles sont introduites, avec un point de vue les affectant au statut de ressources disponibles. L'organisation quotidienne du travail et les décisions relatives au travail ne sont pas mentionnées dans ces travaux.
- la représentation du croisement spatio-temporel qui est une particularité du système d'élevage rarement abordée : il n'existe aucun travail qui mette ces deux dimensions sur le même plan, l'un ou l'autre est toujours privilégié. Ce problème du croisement spatio-temporel, déjà soulevé par Landais en 1987 et Lhoste en 1984 notamment du fait de la mobilité des animaux sur le parcellaire n'a donc pas été l'objet de grandes avancées (Lhoste 1984; Landais 1987).

Références

- Agabriel, J., S. Ingrand.** "Modelling the performance of the beef cow to build a herd functioning simulator". *Animal Research* **53**, 5(2004): 347-361.
- Allen, J. F.** "Maintaining knowledge about temporal intervals". *Communications of the ACM* **26**, 11(1983): 832-843.
- Allen, M. S., T. Stewart.** "A simulation model for a swine breeding unit producing feeder pigs". *Agricultural Systems* **10**, (1983): 193-211.
- Anderies, J. M., M. A. Janssen, B. H. Walker.** "Grazing management, resilience, and the dynamics of a fire-driven rangeland system". *Ecosystems* **5**, 1(2002): 23-44.
- Andrieu, N.** *Diversité du territoire de l'exploitation d'élevage et sensibilité du système fourrager aux aléas climatiques : étude empirique et modélisation*, Thèse de Doctorat, Institut National Agronomique Paris-Grignon, Paris, 2004, 320 pp.
- Andrieu, N., C. Poix, E. Josien, M. Duru.** "Simulation of forage management strategies considering farm-level diversity: Example of dairy farms in the Auvergne". *Computers and Electronics in Agriculture* **55**, (2007): 36-48.
- Antle, J. M., S. M. Capalbo.** "Econometric-process models for integrated assessment of agricultural production systems". *American Journal of Agricultural Economics* **83**, 2(2001): 389-401.
- Apt, V., H. Pierreval, S. Lardon, J. Steffe.** *Modéliser le fonctionnement et l'organisation des exploitations agricoles : quelles méthodes pour le secteur agricole ?* On: Proc. Conférence Francophone de Modélisation et Simulation MOSIM'06, Rabat, Maroc, 3-5 avril 2006.
- Attonaty, J. M., M. H. Chatelin, F. Garcia.** "Interactive simulation modeling in farm decision-making". *Computers and Electronics in Agriculture* **22**, 2/3(1999): 157-170.
- Attonaty, J. M., M. H. Chatelin, J. C. Poussin.** L'évolution des méthodes et langages de simulation, in J. Brossier, B. Vissac and J. L. Le Moigne Eds., *Modélisation systémique et systèmes agraires*, INRA, Paris, 1990, 119-133.
- Attonaty, J. M., L. G. Soler.** Reviewing strategic decision making aids, in J. Brossier, L. De Bonneval and E. Landais Eds., *Systems studies in agriculture and rural development*, INRA, Paris, 1994, 291-308.
- Aubry, C.** *La gestion technique des exploitations agricoles, composante de la théorie agronomique*, Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, 2007, 101 pp.
- Aubry, C., J. M. Paillat, F. Guerrin.** "A conceptual representation of animal waste management at the farm scale: The case of the Reunion Island". *Agricultural Systems* **88**, 2-3(2006): 294-315.
- Aubry, C., F. Papy, A. Capillon.** "Modelling decision-making processes for annual crop management". *Agricultural Systems* **56**, 1(1998): 45-65.
- Bah, A., I. Touré, G. Leclerc.** Modélisation et Simulation Multi-agents : Concepts, Méthodes et Outils. Synthèse bibliographique, Projet ADD-TRANS, Pôle Pastoral Zones Sèches, 2006, 44 pp.
- Balent, G., A. Gibon.** "Définition et représentation du système pastoral. Application aux Pyrénées Centrales. Articulations des points de vue du pastoraliste et du zootechnicien". *Etudes et Recherches sur les Systèmes Agraires et le Développement* **11**, (1987): 65-78.

- Baumont, R., D. Cohen-Salmon, S. Prache, D. Sauvant.** "A mechanistic model of intake and grazing behaviour in sheep integrating sward architecture and animal decisions". *Animal Feed Science and Technology* **112**, 1/4(2004): 5-28.
- Baumont, R., B. Dumont, P. Carrere, L. Perochon, C. Mazel, C. Force, S. Prache, F. Louault, J. F. Soussana, D. R. C. Hill, M. Petit.** *Développement d'un modèle multi-agents spatialisé d'un troupeau de ruminants pâturant une prairie hétérogène*. On: Proc. Renc. Rech. Rumin. 9, I. d. l'Élevage Ed., Paris, 69-72.
- Bellon, S., N. Girard, G. Guerin.** "Characterization of practices-seasons for understanding the planning of a grazing year". *Fourrages*, 158(1999): 115-132.
- Bellon, S., F. Lescourret, J. P. Calmet.** "Characterisation of apple orchard management systems in a French Mediterranean Vulnerable Zone". *Agronomie* **21**, 3(2001): 203-213.
- Berentsen, P. B. M., G. W. J. Giesen.** "An environmental-economic model at farm level to analyse institutional and technical change in dairy farming". *Agricultural Systems* **49**, 2(1995): 153-175.
- Berentsen, P. B. M., G. W. J. Giesen, J. A. Renkema.** "Introduction of seasonal and spatial specification to grass production and grassland use in a dairy farm model". *Grass and Forage Science* **55**, 2(2000): 125-137.
- Bernet, T., O. Ortiz, R. D. Estrada, R. Quiroz, S. M. Swinton.** "Tailoring agricultural extension to different production contexts: a user-friendly farm-household model to improve decision-making for participatory research". *Agricultural Systems* **69**, 3(2001): 183-198.
- Berntsen, J., B. Petersen, B. Jacobsen, J. Olesen, N. Hutchings.** "Evaluating nitrogen taxation scenarios using the dynamic whole farm simulation model FASSET". *Agricultural Systems* **76**, (2003): 817-839.
- Beukes, P., R. M. Cowling, S. I. Higgins.** "An ecological economic simulation model of a non-selective grazing system in the Nama Karoo". *Ecological Economics* **42**, (2002): 221-242.
- Bonaudo, T., P. Bommel, J. F. Tourrand.** *Modélisation des fronts pionniers de la Transamazonienne*. On: Proc. CABM-HEMA-SMAGET, Bourg-Saint-Maurice, France, 21.
- Bonnemaire, J., C. Raichon.** "Feed resources utilization : historical background and state of some livestock production areas". *Etud. Rech. Syst. Agraires Dév.* **16**, (1989): 31-45.
- Bonneviale, J. R., R. Russiau, E. Marshall.** *Approche globale de l'exploitation agricole. Comprendre le fonctionnement de l'exploitation agricole : une méthode pour la formation et le développement*. Dijon: INRAP, 1989, 329 pp.
- Bontkes, T. S., H. van Keulen.** "Modelling the dynamics of agricultural development at farm and regional level". *Agricultural Systems* **76**, 1(2003): 379-396.
- Bousquet, F.** Multi-agent systems, companion modeling and land use change, in E. F. Lambin and H. Geist Eds., *Land-use and land-cover change, Local processes and global impacts.*, Springer, Berlin, 2006.
- Bousquet, F., I. Bakam, H. Proton, C. Le Page.** *Cormas : Common-Pool Resources and Multi-Agent Systems*. On: Proc. 11ème Conférence Internationale sur les Applications Industrielles et d'ingénierie de l'Intelligence Artificielle et de Systèmes Experts, Benicassim Castellon, 826-837.
- Bousquet, F., J. C. Castella, G. Treuil, C. Barnaud, S. Boissau, S. Kam.** "Using multi-agent systems in a companion modelling approach for agro-ecosystem management in South-east Asia". *Outlook on Agriculture* **36**, 1(2007): 57-62.

- Brereton, A. J., N. M. Holden, D. A. McGilloway, O. T. Carton.** "A model describing the utilization of herbage by cattle in a rotational grazing system". *Grass and Forage Science* **60**, 4(2005): 367-384.
- Buyse, J., G. Van Huylenbroeck, I. Vanslebrouck, P. Vanrolleghem.** "Simulating the influence of management decisions on the nutrient balance of dairy farms". *Agricultural Systems* **86**, 3(2005): 333-348.
- Cabrera, V. E., N. E. Breuer, P. E. Hildebrand, D. Letson.** "The dynamic North Florida dairy farm model: a user-friendly computerized tool for increasing profits while minimizing N leaching under varying climatic conditions". *Computers and Electronics in Agriculture* **49**, 2(2005): 286-308.
- Cabrera, V. E., P. E. Hildebrand, J. W. Jones, D. Letson, A. d. Vries.** "An integrated North Florida dairy farm model to reduce environmental impacts under seasonal climate variability". *Agriculture, Ecosystems & Environment* **113**, 1/4(2006): 82-97.
- Cacho, O. J., J. D. Finlayson, A. C. Bywater.** "A simulation model of grazing sheep. 2. Whole farm model". *Agricultural Systems* **48**, 1(1995): 27-50.
- Cannas, A., L. O. Tedeschi, D. G. Fox, A. N. Pell, P. J. v. Soest.** "A mechanistic model for predicting the nutrient requirements and feed biological values for sheep". *Journal of Animal Science* **82**, 1(2004): 149-169.
- Capillon, A., H. Manichon.** Guide d'étude de l'exploitation agricole à l'usage des agronomes. Paris: Institut National Agronomique Paris-Grignon, APCA, 1991, 65 pp.
- Carberry, P. S., Z. Hochman, R. L. McCown, N. P. Dalgliesh, M. A. Foale, P. L. Poulton, J. N. G. Hargreaves, D. M. G. Hargreaves, S. Cawthray, N. Hillcoat, M. J. Robertson.** "The FARMSCAPE approach to decision support: farmers', advisers', researchers' monitoring, simulation, communication and performance evaluation". *Agricultural Systems* **74**, 1(2002): 141-177.
- Castelan-Ortega, O. A., R. H. Fawcett, C. Arriaga-Jordan, M. Herrero.** "A decision support system for smallholder campesino maize-cattle production systems of the Toluca Valley in Central Mexico. Part I - Integrating biological and socio-economic models into a holistic system". *Agricultural Systems* **75**, 1(2003): 1-21.
- Caswell, H., A. M. John.** From the individual to the population in demographics models., in D. L. De Angelis and L. G. Gross Eds., *Individual-based models and approaches in ecology*, Chapman & Hall, New-York, 1992, 36-61.
- Cerf, M., J. M. Meynard.** "Les outils de pilotage des cultures : diversité de leurs usages et enseignements pour leur conception". *Natures Sciences Sociétés* **14**, (2006): 19-29.
- Chardon, X., C. Rigolot, C. Baratte, A. Le Gall, S. Espagnol, R. Martin-Clouaire, J. P. Rellier, C. Raison, J. C. Poupa, P. Faverdin.** *Melodie: a whole-farm model to study the dynamics of nutrients in integrated dairy and pig farms.* On: Proc. International Congress on Modelling and Simulation (MODSIM 2007), Christchurch, New-Zealand, Decembre 10-13 2007.
- Chawatama, S., L. R. Ndlovu, F. D. Richardson, F. Mhlanga, K. Dzama.** "A simulation model of draught animal power in smallholder farming systems. Part I: Context and structural overview". *Agricultural Systems* **76**, 2(2003): 415-440.
- Clancey, W.** "Simulating activities : related motives, deliberation, and attentive coordination". *Journal of Cognitive Systems Research* **3**, (2002): 471-499.
- Coléno, F.** "Une représentation des systèmes de production agricoles par ateliers". *Cahiers de l'agriculture* **11**, (2002): 221-225.

- Coleno, F. C., M. Duru.** "A model to find and test decision rules for turnout date and grazing area allocation for a dairy cow system in spring". *Agricultural Systems* **61**, 3(1999): 151-164.
- Coquil, X., P. Faverdin, F. Garcia.** *Modélisation dynamique de la démographie d'un troupeau bovin laitier*, Mémoire de fin d'études, ENSAR, Rennes, 2004, 22 pp.
- Coquillard, P., D. R. C. Hill.** *Modélisation et Simulation des Ecosystèmes*, 1997, 273 pp.
- Corson, M. S., R. H. Skinner, C. A. Rotz.** "Modification of the SPUR rangeland model to simulate species composition and pasture productivity in humid temperate regions". *Agricultural Systems* **87**, 2(2006): 169-191.
- Costa, F. P., T. Rehman.** "Unravelling the rationale of 'overgrazing' and stocking rates in the beef production systems of central Brazil using a bi-criteria compromise programming model". *Agricultural Systems* **83**, 3(2005): 277-295.
- Cournut, S.** *Le fonctionnement des systèmes biologiques pilotés : simulation à événements discrets d'un troupeau ovin conduit en trois agnelages en deux ans*, Thèse de Doctorat, université Claude Bernard, Lyon I, 2001, 418 pp.+annexes.
- Cournut, S., B. Dedieu.** "A discrete events simulation of flock dynamics: a management application to three lambings in two years". *Animal Research* **53**, 5(2004): 383-403.
- Cox, P. G.** "Some issues in the design of agricultural decision support systems". *Agricultural Systems* **52**, 2/3(1996): 355-381.
- Cros, M. J., M. Duru, F. Garcia, R. Martin-Clouaire.** "Simulating rotational grazing management". *Environment International* **27**, 2/3(2001): 139-145.
- Cros, M. J., M. Duru, F. Garcia, R. Martin-Clouaire.** "A biophysical dairy farm model to evaluate rotational grazing management strategies". *Agronomie* **23**, 2(2003): 105-122.
- Cros, M. J., M. Duru, F. Garcia, R. Martin-Clouaire.** "Simulating management strategies: the rotational grazing example". *Agricultural Systems* **80**, 1(2004): 23-42.
- Crosson, P., P. O'Kiely, F. P. O'Mara, M. Wallace.** "The development of a mathematical model to investigate Irish beef production systems". *Agricultural Systems* **89**, 2/3(2006): 349-370.
- Davis, R., H. Shrobe, P. Szolovits.** "What is knowledge representation ?" *AI Magazine* **14**, 1(1993): 17-33.
- Dedieu, B., S. Cournut, S. Ingrand, L. Perochon, J. Agabriel.** *The production workshop to model herd management decisions : examples in sheep and beef cattle dynamic herd models*. On: Proc. EAAP Symposium, Benevento (Italy), 2003, 26-29 August, 118, 379-384.
- Deffontaines, J. P., S. Lardon** Eds. *Itinéraires cartographiques et développement*. Versailles: INRA, 1994, 136 pp.
- Delaby, L., J. L. Peyraud, P. Faverdin.** *Development of a computer-assisted grazing organizer: Patur'IN*. On: Proc. Renc. Rech. Rumin. 7, Paris, France, 6-7 decembre 2000.
- Delagarde, R., M. O'Donovan.** "Modelling of daily herbage intake and milk production by grazing dairy cows". *INRA Productions Animales* **18**, 4(2005): 241-253.
- Depigny, S.** *Paysagri : un modèle d'évolution d'un paysage agricole intégrant la sensibilité au paysage des agriculteurs. Exemple de systèmes de production agricole herbagers combinant pratiques de production et d'entretien.*, Thèse de doctorat en sciences agronomiques, UMR Métafort, Ecole doctorale ABIES, Paris, 2007, 200 pp.

- Diaz-Solis, H., M. M. Kothmann, W. E. Grant, R. De Luna-Villarreal.** "Use of irrigated pastures in semi-arid grazinglands: A dynamic model for stocking rate decisions". *Agricultural Systems* **88**, 2-3(2006): 316-331.
- Diaz-Solis, H., M. M. Kothmann, W. T. Hamilton, W. E. Grant.** "A simple ecological sustainability simulator (SESS) for stocking rate management on semi-arid grazinglands". *Agricultural Systems* **76**, 2(2003): 655-680.
- Donnelly, J. R., M. Freer, L. Salmon, A. D. Moore, R. J. Simpson, H. Dove, T. P. Bolger.** "Evolution of the GRAZPLAN decision support tools and adoption by the grazing industry in temperate Australia". *Agricultural Systems* **74**, 1(2002): 115-139.
- Donnelly, J. R., A. D. Moore, M. Freer.** "GRAZPLAN: decision support systems for Australian grazing enterprises-I. Overview of the GRAZPLAN project, and a description of the MetAccess and LambAlive DSS". *Agricultural Systems* **54**, 1(1997): 57-76.
- Dounias, I., C. Aubry, A. Capillon.** "Decision-making processes for crop management on African farms. Modelling from a case study of cotton crops in northern Cameroon". *Agricultural Systems* **73**, 3(2002): 233-260.
- Doyle, C. J., J. A. Boars, A. C. Bywater.** "A simulation model of bull beef production under rotational grazing in the Waikato Region of New Zealand". *Agricultural Systems* **31**, 3(1989): 247-278.
- Dumont, B., D. R. C. Hill.** "Multi-agent simulation of group foraging in sheep: effects of spatial memory, conspecific attraction and plot size". *Ecological Modelling* **141**, 1/3(2001): 201-215.
- Duru, M., B. Hubert.** "Management of grazing systems: from decision and biophysical models to principles for action". *Agronomie* **23**, 8(2003): 689-703.
- Duru, M., F. Papy, L. G. Soler.** "Le concept de modèle général et l'analyse du fonctionnement de l'exploitation agricole". *C.R. Acad. Agric. Fr.* **74**, 4(1988): 81-93.
- Edward-Jones, G., M. McGregor.** The necessity, theory and reality of developing models of farm households, in J. B. Dent and M. McGregor Eds., *Rural and farming systems analysis, European perspectives*, CAB UK, 1994, 338-352.
- Ezanno, P.** "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". *Ecological Modelling* **188**, 2/4(2005): 470-482.
- Finlayson, J. D., K. Betteridge, A. MacKay, B. Thorrold, P. Singleton, D. A. Costall.** "A simulation model of the effects of cattle treading on pasture production on North Island, New Zealand, hill land". *New Zealand Journal of Agricultural Research* **45**, 4(2002): 255-272.
- Fitzgerald, J. B., A. J. Brereton, N. M. Holden.** "Assessment of regional variation in climate on the management of dairy cow systems in Ireland using a simulation model". *Grass and Forage Science* **60**, 3(2005): 283-296.
- Fountas, S., D. Wulfsohn, B. S. Blackmore, H. L. Jacobsen, S. M. Pedersen.** "A model of decision-making and information flows for information-intensive agriculture". *Agricultural Systems* **87**, 2(2006): 192-210.
- Frasier, W. M., G. H. Pfeiffer.** "Optimal replacement and management policies for beef cows". *American Journal of Agricultural Economics* **76**, 4(1994): 847-858.
- Freer, M., A. D. Moore, J. R. Donnelly.** "GRAZPLAN: decision support systems for Australian grazing enterprises-II. The animal biology model for feed intake, production and reproduction and the GrazFeed DSS". *Agricultural Systems* **54**, 1(1997): 77-126.

- Fromageot, A.** Les changements d'échelles, des exploitations agricoles aux territoires. Synthèse bibliographique, Cemagref Clermont Ferrand, Projet ADD-TRANS, 2006, 19 pp.
- Garcia, F., P. Faverdin, L. Delaby, J. L. Peyraud.** *Tournesol : un modèle pour simuler les assolements en exploitation bovine laitière.* On: Proc. Renc. Rech. Rumin. 12, I. d. l'Elevage Ed., Paris, 196-198.
- Girard, N.** *Modéliser une représentation d'experts dans le champ de la gestion de l'exploitation agricole,* Thèse de Doctorat, Université Claude Bernard, INRA SAD/IE, Lyon I, 1995, 234 pp.+annexes.
- Girard, N., S. Bellon, B. Hubert, S. Lardon, C. H. Moulin, P. L. Osty.** "Categorising combinations of farmers' land use practices: an approach based on examples of sheep farms in the south of France". *Agronomie* **21**, 5(2001): 435-459.
- Girard, N., B. Hubert.** "Modelling expert knowledge with knowledge-based systems to design decision aids: the example of a knowledge-based model on grazing management". *Agricultural Systems* **59**, 2(1999): 123-144.
- Gouttenoire, L.** *Comprendre le fonctionnement dynamique d'un système d'élevage et les réponses des animaux aux pratiques,* Mémoire de fin d'études d'ingénieur agronome, AgroParis Tech, Paris-Grignon, 2007, 85 pp.
- Graves, S. C., A. H. G. Rinnooy Kan, P. H. Zipkin** Eds. *Logistics of production and inventory.* Amsterdam, Pays-Bas: North Holland, 1993, 760 pp.
- Gueret, C., C. Prins, M. Sevaux** Eds. *Programmation linéaire: : 65 problèmes d'optimisation modélisés et résolus avec Visual Xpress.* Paris, 2000, 384 pp.
- Guerrin, F.** "MAGMA: a simulation model to help manage animal wastes at the farm level". *Computers and Electronics in Agriculture* **33**, 1(2001): 35-54.
- Guerrin, F.** *Représentation des connaissances pour la décision et l'action,* Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, Université de la Réunion, 2007, 155 pp.
- Guevara, J. C., J. H. Silva Colomer, O. R. Estevez, J. A. Paez.** "Simulation of the economic feasibility of fodder shrub plantations as a supplement for goat production in the north-eastern plain of Mendoza, Argentina". *Journal of Arid Environments* **53**, 1(2003): 85-98.
- Guimaraes, P. H. S., F. E. Madalena, I. M. Cezar.** "Comparative economics of Holstein/Gir F1 dairy female production and conventional beef cattle suckler herds - a simulation study". *Agricultural Systems* **88**, 2/3(2006): 111-124.
- Hansen, J. W., J. W. Jones.** "Scaling-up crop models for climate variability applications". *Agricultural Systems* **65**, 1(2000): 43-72.
- Hary, I.** "Derivation of steady state herd productivity using stage-structured population models and mathematical programming". *Agricultural Systems* **81**, 2(2004): 133-152.
- Herrero, M., R. H. Fawcett, J. B. Dent.** "Bio-economic evaluation of dairy farm management scenarios using integrated simulation and multiple-criteria models". *Agricultural Systems* **62**, 3(1999): 169-188.
- Herrero, M., R. H. Fawcett, J. B. Dent.** "Modelling the growth and utilisation of kikuyu grass (*Pennisetum clandestinum*) under grazing. 2. Model validation and analysis of management practices". *Agricultural Systems* **65**, 2(2000): 99-111.
- Herrero, M., R. H. Fawcett, V. Silveira, J. Busque, A. Bernues, J. B. Dent.** "Modelling the growth and utilisation of kikuyu grass (*Pennisetum clandestinum*) under grazing. 1. Model definition and parameterisation". *Agricultural Systems* **65**, 2(2000): 73-97.

- Herve, D., D. Genin, J. Migueis.** "A modelling approach for analysis of agro pastoral activity at the one-farm level". *Agricultural Systems* **71**, 3(2002): 187-206.
- Hill, D. R. C.** Analyse orientee objets et modelisation par simulation. Paris: Addison Wesley, 1993, 362 pp.
- Hubert, B.** "Pastoralisme et territoire, modélisation des pratiques d'utilisation". *Cahiers de l'Agriculture* **3**, (1994): 9-22.
- Hubert, B., N. Girault** Eds. *De la touffe d'herbe au paysage, troupeaux et territoires, échelles et organisations*. Versailles: INRA, 1988, 336 pp.
- Ingrand, S., S. Cournot, B. Dedieu, F. Antheaume.** "Modelling beef herd management decisions". *INRA Productions Animales* **16**, 4(2003): 263-270.
- Ingrand, S., B. Dedieu, J. Agabriel, L. Perochon.** *Representation of the beef cattle herd functioning according to the combination of rearing rules: a modelling approach*. On: Proc. Renc. Rech. Rumin. 9, I. d. l'Elevage Ed., Paris (France), 4-5 decembre 2002, 61-64.
- Jacquet-Lagrece, E.** Programmation lineaire, modélisation et mise en oeuvre informatique. Paris: Economica, 1998, 112 pp.
- Jalvingh, A. W., J. A. M. v. Arendonk, A. A. Dijkhuizen.** "Dynamic probabilistic simulation of dairy herd management practices. I. Model description and outcome of different seasonal calving patterns". *Livestock Production Science* **37**, 1-2(1993): 107-131.
- Jalvingh, A. W., J. A. M. v. Arendonk, A. A. Dijkhuizen, J. A. Renkema.** "Dynamic probabilistic simulation of dairy herd management practices. II. Comparison of strategies in order to change a herd's calving pattern". *Livestock Production Science* **37**, 1-2(1993): 133-152.
- Jalvingh, A. W., A. A. Dijkhuizen, J. A. M. v. Arendonk.** "Dynamic probabilistic modelling of reproduction and replacement management in sow herds. General aspects and model description". *Agricultural Systems* **39**, (1992): 133-152.
- Janssen, M. A.** Complexity and ecosystem management: the theory and practise of multi-agent approaches. Cheltenham: Edward Elgar Publishers, 2002.
- Janssen, M. A., J. M. Anderies, B. H. Walker.** "Robust strategies for managing rangelands with multiple stable attractors". *Journal of Environmental Economics and Management* **47**, 1(2004): 140-162.
- Janssen, M. A., B. H. Walker, J. Langridge, N. Abel.** "An adaptative agent model for analysing co-evolution of management and policies in a complex rangeland system". *Ecological Modelling* **131**, (2000): 249-268.
- Joannon, A.** *Coordination spatiale des systèmes de culture pour la maîtrise des processus écologiques. Cas du ruissellement érosif dans les bassins versants agricoles du pays de Caux, Haute Normandie*, Thèse de Doctorat, Institut National Agronomique Paris-Grignon, Paris, 2004, 230 pp. + annexes.
- Jorgensen, E., A. R. Kristensen.** *An object oriented simulation model of a pig herd with emphasis on information flow*. On: Proc. Farm Animal Computer Technologies Conferences, Orlando, Florida, 1995, March 7-9, 206-215.
- Jouven, M.** *Quels équilibres entre production animale et utilisation durable des prairies dans les systèmes bovins allaitants herbagers ? Une approche par modélisation des interactions conduite-troupeau-ressources.*, Thèse de Doctorat, Institut National Agronomique Paris-Grignon, Paris, 2006, 209 pp.+annexes.

- Jouven, M., P. Carrere, R. Baumont.** "Model predicting dynamics of biomass, structure and digestibility of herbage in managed permanent pastures. 1. Model description". *Grass and Forage Science* **61**, 2(2006): 112-124.
- Jouven, M., P. Carrere, R. Baumont.** "Model predicting dynamics of biomass, structure and digestibility of herbage in managed permanent pastures. 2. Model evaluation". *Grass and Forage Science* **61**, 2(2006): 125-133.
- Juristo, N., A. Moreno.** "Introductory paper: Reflections on conceptual modelling". *Data and Knowledge Engineering* **33**, (2000): 103-117.
- Kaine, G. W., P. R. Tozer.** "Stability, resilience and sustainability in pasture-based grazing systems". *Agricultural Systems* **83**, 1(2005): 27-48.
- Kamp, J. A. L.** *Knowledge based systems : from research to practical application*. On: Proc. ICCTA, Congress on ICT applications in agriculture, Wageningen, 16/06/1996, 47-53.
- Keating, B. A., P. S. Carberry, G. L. Hammer, M. E. Probert, M. J. Robertson, D. Holzworth, N. I. Huth, J. N. G. Hargreaves, H. Meinke, Z. Hochman, G. McLean, K. Verburg, V. Snow, J. P. Dimes, M. Silburn, E. Wang, S. Brown, K. L. Bristow, S. Asseng, S. Chapman, R. L. McCown, D. M. Freebairn, C. J. Smith.** "An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation". *European Journal of Agronomy* **18**, 3/4(2003): 267-288.
- Keating, B. A., R. L. McCown.** "Advances in farming systems analysis and intervention". *Agricultural Systems* **70**, 2-3(2001): 555-579.
- Kennedy, J. O. S.** *Dynamic programming : applications to agriculture and natural resources*. New York: Elsevier Applied Science Publishers, 1986, 341 pp.
- Kirikova, M.** "Explanatory capability of enterprise models". *Data and Knowledge Engineering* **33**, (2000): 119-136.
- Koenig, G.** *Management stratégique. Paradoxes, interaction et apprentissage*. Paris: Nathan, 1996, 543 pp.
- Kristensen, A. R.** "A general software system for Markov decision processes in herd management applications". *Computers and Electronics in Agriculture* **38**, 3(2003): 199-215.
- Kristensen, A. R., J. T. Sorensen, S. Clausen.** "Simulated effects on dairy cow and herd production of different grazing intensities". *Agricultural Systems* **55**, (1997): 123-138.
- Landais, E.** *Recherches sur les systèmes d'élevage. Questions et perspectives*. Document de travail unité INRA-SAD, INRA publications, 1987, 75 pp.
- Landais, E.** "Principes de modélisation des systèmes d'élevage. Approches graphiques". *Les Cahiers de la Recherche-Développement* **32**, (1992): 82-95.
- Landais, E.** Ed. *Pratiques d'élevage extensif, identifier, modéliser, évaluer*. Versailles: INRA publications, 1993, 389 pp.
- Landais, E., J. Bonnemaire.** "La zootechnie, art ou science ? entre nature et société, l'histoire exemplaire d'une discipline finalisée". *Courrier de l'Environnement de l'INRA* **27**, (1996): 23-44.
- Lansink, A. O., M. v. d. Berg, R. Huirne.** "Analysis of strategic planning of Dutch pig farmers using a multivariate probit model". *Agricultural Systems* **78**, 1(2003): 73-84.
- Le Moigne, J. L.** *La modélisation des systèmes complexes*. Paris: Bordas, 1990, 178 pp.
- Lehenbauer, T. W., J. W. Oltjen.** "Dairy cow culling strategies: making economical culling decisions". *Journal of Dairy Science* **81**, 1(1998): 264-271.

- Lesnoff, M.** *Etude de la dynamique et de la productivité des populations domestiques tropicales par les modèles matriciels en temps discret : les populations d'ovins au Sénégal*, Thèse de Doctorat, Université de Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 2000, 294 pp.
- Lhoste, P.** "Le diagnostic sur le système d'élevage." *Les Cahiers de la Recherche-Développement*, (1984): 84-88.
- Li Pun, H., C. U. Leon-Velarde, V. M. Mares.** Livestock, ethics, quality of life and development in Latine America, in J. Hodges and K. Han Eds., *Livestock, ethics and quality of life*, CABI publishing, New York, 1999, 269 pp.
- Louhichi, K., V. Alary, P. Grimaud.** "A dynamic model to analyse the bio-technical and socio-economic interactions in dairy farming systems on the Reunion Island". *Animal Research* **53**, 5(2004): 363-382.
- Madelrieux, S.** *Ronde des saisons, vie des troupeaux et labeur des hommes. Modélisation de l'organisation du travail dans les exploitations d'élevage*, Thèse de Doctorat, Institut National Agronomique Paris-Grignon, Ecole Doctorale ABIES, Paris, 2004, 263 pp.
- Madelrieux, S., B. Dedieu, L. Dobremez.** "ATELAGE: modelling to qualify work organisation in livestock farming systems". *INRA Productions Animales* **19**, 1(2006): 47-58.
- Magne, M. A., M. Cerf, S. Ingrand.** *Modelling the farmers' information system to improve Desicion Support Systems*. On: Proc. Farming Systems Design 2007, Int. Symposium on Methodologies on Integrated Analysis on Farm Production Systems, M. Donatelli, A. Hatfield and A. Rizzoli Eds., Catania (Italy), 10-12 September 2007, book 2 - Field-farm scale design and improvement, addendum.
- March, J. G.** Rationalité limitée, ambiguïté et ingénierie des choix, in *Décisions et organisations*, Les éditions d'organisation, Paris, 133-162, 1978.
- Marshall, E., J. R. Bonneviale, I. Francfort.** Fonctionnement et diagnostic global de l'exploitation agricole. Une méthode interdisciplinaire pour la formation et le développement. Dijon: ENESAD-SED, 1994, 173 pp.
- Martel, G., B. Dedieu, J. Y. Dourmad.** *Les représentations biotechniques du fonctionnement des troupeaux de truies : analyse comparative et perspectives*. On: Proc. Journées Recherche Porcine, 2006, 38, 255-262.
- Martin-Clouaire, R., M. Duru, S. Cournut, E. Josien.** Modèles dynamiques du fonctionnement des élevages dans leurs dimensions spatiales, biotechniques et socio-économiques. *Revue bibliographique*, Projet ADD-TRANS, 2006, 11 pp.
- Martin-Clouaire, R., J. P. Rellier.** *Modélisation et simulation de la conduite d'un système de production agricole*. On: Proc. Conférence Francophone de Modélisation et Simulation MOSIM'03, Toulouse, France, 23-25 avril 2003.
- Martin-Clouaire, R., J. P. Rellier.** *Representing and interpreting flexible production management plans*. On: Proc. International Conference on Conceptual Modeling and Simulation, CMS'05, Marseille, France, 20-22 octobre 2005.
- Martinet, A. C.** Epistémologie de la stratégie, in A. C. Martinet Ed. *Epistémologies et sciences de gestion*, Economica, Paris, 1990, 211-236.
- Matthews, K. B., I. A. Wright, K. Buchan, D. A. Davies, G. Schwarz.** "Assessing the options for upland livestock systems under CAP reform: developing and applying a livestock systems model within whole-farm systems analysis". *Agricultural Systems* **90**, 1/3(2006): 32-61.

- McAllister, R. R. J., J. E. Gross, C. Stokes, J.** *Rangeland consolidation patterns in Australia: An agent-based modelling approach*. On: Proc. CABM-HEMA-SMAGET, Bourg-Saint-Maurice, France, 3-5 avril 2006.
- McCown, R. L.** "Changing systems for supporting farmers' decisions: problems, paradigms, and prospects". *Agricultural Systems* **74**, 1(2002): 179-220.
- Meot, A., B. Hubert, J. Lasseur.** "Organisation of the pastoral territory and grazing management: joint modelling of grazing management practices and plant cover dynamics". *Agricultural Systems* **76**, 1(2003): 115-139.
- Milleville, P., I. Combes, J. Y. Marchal** Eds. *Systèmes d'élevage sahéliens de l'Oudalan, étude de cas*. Ouagadougou, Burkina-Faso: Orstom, 1982, 129 pp.
- Milner-Gulland, E. J., C. Kerven, R. Behnke.** "A multi-agent system model of pastoralist behaviour in Kazakhstan". *Ecol Complex* **3**, (2006): 23-36.
- Mintzberg, H.** "Patterns in strategy formation". *Manage. Sci.* **24**, 9(1978): 934-948.
- Mintzberg, H.** *The rise and fall of strategic planning*. New York: Free Press, 1994, 458 pp.
- Mohtar, R. H., T. Zhai, X. Chen.** "A world wide web-based grazing simulation model (GRASIM)". *Computers and Electronics in Agriculture* **29**, 3(2000): 243-250.
- Moore, A. D., J. R. Donnelly, M. Freer.** "GRAZPLAN: decision support systems for Australian grazing enterprises. III. Pasture growth and soil moisture submodels, and the GrassGro DSS". *Agricultural Systems* **55**, 4(1997): 535-582.
- Morales Grosskopf, H.** *L'évaluation des conséquences de décisions stratégiques en élevage extensif en Uruguay. Une approche par systèmes multi-agents*, Thèse de Doctorat, AgroParisTech, 2007, 234 pp.
- Moulin, C., N. Girard, B. Dedieu.** "The functional analysis of feeding systems". *Fourrages*, No.167(2001): 337-363.
- Naitlho, P., S. Lardon, M. Yotte.** *Approche spatiale de l'exploitation agricole. Modélisation de l'organisation spatiale d'une exploitation*: EDUCAGRI, 2003, 111 pp.
- Nielsen, B. K., A. R. Kristensen, S. M. Thamsborg.** "Optimal decisions in organic steer production - a model including winter feed level, grazing strategy and slaughtering policy". *Livestock Production Science* **88**, 3(2004): 239-250.
- Nielsen, H. M., A. Groen, J. Pedersen, P. Berg.** "Stochastic simulation of economic values and their standard deviations for production and functional traits in dairy cattle under current and future Danish production circumstances". *Acta Agriculturae Scandinavica* **54**, 3(2004): 113-126.
- Oldham, J. D., G. C. Emmans.** Animal performance as the criterion for feed evaluation, in J. Wiseman and C. D.J.A. Eds., *Feedstuff evaluation*, Butterworths, London, 1990, 73-90.
- Osty, P. L.** "Livestock farming systems and landscape in the Causse Mejan region". *Economie Rurale*, 128(1978): 15-22.
- Pacaud, T., S. Cournut, C. Poix.** *Representing system dynamics with temporal intervals; application to livestock farming systems modelling*. On: Proc. Farming Systems Design 2007, Int. Symposium on Methodologies on Integrated Analysis on Farm Production Systems, M. Donatelli, A. Hatfield and A. Rizzoli Eds., Catania (Italy), 10-12 September 2007, book 2 - Field-farm scale design and improvement, 249-250.
- Pacini, C., A. Wossink, G. Giesen, R. Huirne.** "Ecological-economic modelling to support multi-objective policy making: a farming systems approach implemented for Tuscany". *Agriculture, Ecosystems & Environment* **102**, 3(2004): 349-364.

- Pandey, S., J. B. Hardaker.** "The role of modelling in the quest for sustainable farming systems". *Agricultural Systems* **47**, 4(1995): 439-450.
- Papy, F., J. Mousset.** *Vers une communication entre savoirs théorique et pratique (intérêt d'un logiciel de simulation)*. On: Proc. Congrès international d'informatique agricole "l'informatique agricole en quête d'utilisateurs", Versailles (France), 177-180.
- Parsons, D. J., A. C. Armstrong, J. R. Turnpenny, A. M. Matthews, K. Cooper, J. A. Clark.** "Integrated models of livestock systems for climate change studies. 1. Grazing systems". *Global Change Biology* **7**, 1(2001): 93-112.
- Petit, M.** *Théorie de la décision et comportement adaptatif des agriculteurs*. Dijon: ENSSAA, INPSA, INRA, INRAP, 1981, 166 pp.
- Pettigrew, J., S. Cornelius, V. Eidman, R. Moser.** "Integration of factors affecting sow efficiency: a modeling approach". *Journal of Animal Science* **63**, (1986): 1314-1321.
- Pfister, F., H. P. Bader, R. Scheidegger, P. Baccini.** "Dynamic modelling of resource management for farming systems". *Agricultural Systems* **86**, 1(2005): 1-28.
- Pla, L. M.** "Review of mathematical models for sow herd management". *Livestock Production Science* **106**, 2-3(2006): 107-119.
- Pla, L. M., J. Conde, J. Pomar.** Sow model for decision aid at farm level, in F. J. Giron Ed. *Applied Decision Analysis*, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1998, 47-62.
- Pla, L. M., C. Pomar, J. Pomar.** "A Markov decision sow model representing the productive lifespan of herd sows". *Agricultural Systems* **76**, 1(2003): 253-272.
- Pleasants, A. B., G. C. Wake, D. G. McCall, S. D. Watt.** "Modelling pasture mass through time in a managed grazing system subject to perturbations resulting from complexity in natural biological processes". *Agricultural Systems* **53**, 2/3(1997): 191-208.
- Pomar, C., D. Harris, P. Savoie, F. Minvielle.** "Computer simulation model of swine production systems. III. A dynamic herd simulation model including reproduction". *Journal of Animal Science* **69**, (1991): 2822-2836.
- Queau, P.** *Eloge de la simulation*. Seyssel: Editions du Champ Vallon, 1986, 257 pp.
- Rewe, T. O., D. Indetie, J. M. K. Ojango, A. K. Kahi.** "Breeding objectives for the Boran breed in Kenya: model development and application to pasture-based production systems". *Animal Science Journal* **77**, 2(2006): 163-177.
- Romera, A. J., S. T. Morris, J. Hodgson, W. D. Stirling, S. J. R. Woodward.** "A model for simulating rule-based management of cow-calf systems". *Computers and Electronics in Agriculture* **42**, 2(2004): 67-86.
- Romera, A. J., S. T. Morris, J. Hodgson, W. D. Stirling, S. J. R. Woodward.** "Comparison of haymaking strategies for cow-calf systems in the Salado Region of Argentina using a simulation model. 1. Effect of herbage mass at cutting and cow stocking rate under a rigid system of management". *Grass and Forage Science* **60**, 4(2005): 399-408.
- Romera, A. J., S. T. Morris, J. Hodgson, W. D. Stirling, S. J. R. Woodward.** "Comparison of haymaking strategies for cow-calf systems in the Salado Region of Argentina using a simulation model. 2. Incorporation of flexibility into the decision rules". *Grass and Forage Science* **60**, 4(2005): 409-416.
- Rook, A. J., N. H. Yarrow.** "Incorporating grazing behaviour measurements in models to predict herbage intake by grazing dairy cows". *Grass and Forage Science* **57**, 1(2002): 19-24.
- Rotz, C. A., D. R. Mertens, D. R. Buckmaster, M. S. Allen, J. H. Harrison.** "A dairy herd model for use in whole farm simulations". *Journal of Dairy Science* **82**, 12(1999): 2826-2840.

- Rotz, C. A., L. D. Satter, D. R. Mertens, R. E. Muck.** "Feeding strategy, nitrogen cycling, and profitability of dairy farms". *Journal of Dairy Science* **82**, 12(1999): 2841-2855.
- Rotz, C. A., F. Taube, M. P. Russelle, J. Oenema, M. A. Sanderson, M. Wachendorf.** "Whole-farm perspectives of nutrient flows in grassland agriculture". *Crop Science* **45**, 6(2005): 2139-2159.
- Rotz, C. A., D. L. Zartman, K. L. Crandall.** "Economic and environmental feasibility of a perennial cow dairy farm". *Journal of Dairy Science* **88**, 8(2005): 3009-3019.
- Roy, B., J. C. Hugonnard.** "Ranking of suburban line extension project on the Paris metro system by a multicriteria method". *Transportation Research* **16A**, (1982): 301-312.
- Salinas, H., R. G. Ramirez, A. Rumayor-Rodriguez.** "A whole-farm model for economic analysis in a goat production system in Mexico". *Small Ruminant Research* **31**, 2(1999): 157-164.
- Sebillotte, M., L. G. Soler.** "Le concept de modèle général et la compréhension du comportement de l'agriculteur". *C.R. Acad. Agric. Fr.* **74**, 4(1988): 59-70.
- Sébillotte, M., L. G. Soler.** Les processus de décision des agriculteurs. Acquis et questions vives., in J. Brossier, B. Vissac and J.-J. Lemoigne Eds., *Modélisation systémique et systèmes agraires*, INRA publications, Paris, 1990, 88-102.
- Shaloo, L., P. Dillon, J. O'Loughlin, M. Rath, M. Wallace.** "Comparison of a pasture-based system of milk production on a high rainfall, heavy-clay soil with that on a lower rainfall, free-draining soil". *Grass and Forage Science* **59**, 2(2004): 157-168.
- Shaloo, L., P. Dillon, M. Rath, M. Wallace.** "Description and validation of the Moorepark dairy system model". *Journal of Dairy Science* **87**, 6(2004): 1945-1959.
- Sheat, G. W., D. A. Clark.** Management of grazing systems : temperate pastures, in J. Hodgson and A. W. Illius Eds., *The ecology and management of grazing systems*, CAB international, 1996, 201-324.
- Simon, H.** "Rationality as process and product of thought". *Am. Econo. Rev.* **68**, 2(1978): 1-16.
- Singh, D.** "Simulation of swine herd population dynamics". *Agricultural Systems* **22**, (1986): 157-183.
- Solano, C., H. Leon, E. Perez, M. Herrero.** "Characterising objective profiles of Costa Rican dairy farmers". *Agricultural Systems* **67**, 3(2001): 153-179.
- Solano, C., H. Leon, E. Perez, M. Herrero.** "Who makes farming decisions? A study of Costa Rican dairy farmers". *Agricultural Systems* **67**, 3(2001): 181-199.
- Sorensen, J. T., E. S. Kristensen, I. Thysen.** "A stochastic model simulating the dairy herd on a PC". *Agricultural Systems* **39**, 2(1992): 177-200.
- Stonehouse, D. P., G. W. d. Vos, A. Weersink.** "Livestock manure systems for swine finishing enterprises". *Agricultural Systems* **73**, 3(2002): 279-296.
- Stoorvogel, J. J., J. M. Antle.** "Regional land use analysis: the development of operational tools". *Agricultural Systems* **70**, 2/3(2001): 623-640.
- Stoorvogel, J. J., J. M. Antle, C. C. Crissman, W. Bowen.** "The tradeoff analysis model: integrated bio-physical and economic modeling of agricultural production systems". *Agricultural Systems* **80**, 1(2004): 43-66.
- Teague, W. R., J. K. Foy.** "Validation of SPUR2.4 rangeland simulation model using a cow-calf field experiment". *Agricultural Systems* **74**, 2(2002): 287-302.
- Teffène, O., Y. Salaun.** *Le modèle de simulation "Porsim" : un outil d'aide à la décision en production porcine.* On: Proc. Journées Recherche Porcine, 15, 129-148.

- Teffène, O., Y. Salaun, M. Querné.** *La gestion prévisionnelle à court terme en élevage porcin, un outil : Porgep*. On: Proc. Journées Recherche Porcine, 18, 189-202.
- Thornton, P. K., K. A. Galvin, R. B. Boone.** "An agro-pastoral household model for the rangelands of East Africa". *Agricultural Systems* **76**, 2(2003): 601-622.
- Thornton, P. K., M. Herrero.** "Integrated crop-livestock simulation models for scenario analysis and impact assessment". *Agricultural Systems* **70**, 2-3(2001): 581-602.
- Tichit, M., S. Ingrand, C. H. Moulin, S. Cournut, J. Lasseur, B. Dedieu.** "Analyse de la diversité des trajectoires productives des femelles reproductrices : intérêts pour la modélisation du fonctionnement du troupeau en élevage allaitant". *INRA Productions Animales* **17**, 2(2004): 123-132.
- Topp, C. F. E., C. J. Doyle.** "Simulating the impact of global warming on milk and forage production in Scotland: 1. The effects on dry-matter yield of grass and grass-white clover swards". *Agricultural Systems* **52**, 2/3(1996): 213-242.
- Topp, C. F. E., C. J. Doyle.** "Simulating the impact of global warming on milk and forage production in Scotland: 2. The effects on milk yields and grazing management of dairy herds". *Agricultural Systems* **52**, 2/3(1996): 243-270.
- Tseveenjav, B., D. J. Garrick, Y. Zagdsuren.** *Simulation model for cashmere goat production system to improve fiber quality in Mongolia*. On: Proc. 8th World Congress on Genetics Applied to Livestock Production, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil, 13-18 August, 2006.
- Turnpenny, J. R., D. J. Parsons, A. C. Armstrong, J. A. Clark, K. Cooper, A. M. Matthews.** "Integrated models of livestock systems for climate change studies. 2. Intensive systems". *Global Change Biology* **7**, 2(2001): 163-170.
- van Calker, K. J., P. B. M. Berentsen, I. M. J. de Boer, G. W. J. Giesen, R. B. M. Huirne.** "An LP-model to analyse economic and ecological sustainability on Dutch dairy farms: model presentation and application for experimental farm "de Marke"". *Agricultural Systems* **82**, 2(2004): 139-160.
- Vayssieres, J., P. Lecomte, F. Guerrin, U. B. Nidumolu.** "Modelling farmers' action: decision rules capture methodology and formalisation structure: a case of biomass flow operations in dairy farms of a tropical island". *Animal* **1**, (2007): 716-733.
- Veysset, P., D. Bebin, M. Lherm.** "Adaptation to Agenda 2000 (CAP reform) and optimisation of the farming system of French suckler cattle farms in the Charolais area: a model-based study". *Agricultural Systems* **83**, 2(2005): 179-202.
- Villalba, D., I. Casaus, A. Sanz, A. Bernues, J. Estany, R. Revilla.** "Stochastic simulation of mountain beef cattle systems". *Agricultural Systems* **89**, 2/3(2006): 414-434.
- Vissac, B.** "Société, race animale et territoire ; entre les théories et l'histoire : réflexion sur une crise". *Natures Sciences Sociétés* **1**, 4(1993): 282-297.
- Wallenius, H., J. Wallenius, P. Vartia.** "An approach to solving multiple criteria macroeconomic policy problems and an application". *Management Science* **24**, (1978): 1021-1030.
- Weersink, A., S. Jeffrey, D. Pannell.** "Farm-level modeling for bigger issues". *Review of Agricultural Economics* **24**, 1(2002): 123-140.
- Wolfova, M., J. Wolf, J. Pribyl, R. Zahradkova, J. Kica.** "Breeding objectives for beef cattle used in different production systems: 1. Model development". *Livestock Production Science* **95**, 3(2005): 201-215.
- Wolfova, M., J. Wolf, R. Zahradkova, J. Pribyl, J. Dano, E. Krupa, J. Kica.** "Breeding objectives for beef cattle used in different production systems: 2. Model application to

production systems with the Charolais breed". *Livestock Production Science* **95**, 3(2005): 217-230.

Woodward, S. J. R., G. C. Wake, D. G. McCall. "Optimal grazing of a multipaddock system using a discrete time model". *Agricultural Systems* **48**, (1995): 119-139.

Yates, C. M., T. Rehman. "A linear programming formulation of the Markovian decision process approach to modelling the dairy replacement problem". *Agricultural Systems* **58**, 2(1998): 185-201.

Annexes

Annexe 1 : requêtes bibliographiques et bibliométrie

Requêtes

- 2 équations de base :
 - ((TI=(modelization OR modelisation OR simulation OR model* OR mode*ling OR optimization) NOT TI=(genetic OR nitrogen OR phosphorus OR kinetic* OR digestive OR nitrification)) AND (TI=("livestock farming" OR "livestock breeding" OR "farm system" OR "farming system" OR cattle OR husbandry OR "dairy farm" OR "breeding policies" OR cow* OR pig* OR sow* OR sheep OR beef OR flock* OR herd* OR grazing OR pasture* OR "forage system*" OR "forage resource*" OR pastoralism OR pastoralist OR fodder OR grassland)))
 - (TI=(modelization OR modelisation OR simulation OR model* OR mode*ling OR optimization)) AND (TS=(labo*r OR "work organisation" OR "decision support system*" OR "decision rules" OR "decision making" OR management OR strategy OR strategies OR workforce)) AND (TS=("farm system*" OR "farming system*"))
- Sources de documentation :
 - bases INRA : 2001 à 2007
 - bases Erita Clermont : 2001 à 2007
 - apports d'experts des différentes disciplines pour les publications antérieures
- Quelques requêtes secondaires :
 - Recherches ponctuelles de références après consultation de publications et suite à des réunions, formations, séminaires, etc.
 - Requêtes spécifiques élevages porcins, caprins et volailles (non inclus dans les équations primaires)

Résultats

- Requête primaire qui a abouti à près de 1000 articles dont plus de 300 retenus après premier tri.
- Eliminations supplémentaires :
 - Systèmes culturels sans composante d'élevage
 - Autres échelles d'organisation que le système d'élevage
 - Travaux de validation de modèles (très nombreux)
 - Modèles de propagation de maladies dans les troupeaux

Bilan

- Des travaux récents pour la plupart (70 % ont moins de 8 ans)
- Grande dominance des systèmes d'élevage d'herbivores ; équation peu adaptée pour les modèles de systèmes hors sol type volailles, pas les mêmes enjeux (de reproduction, de renouvellement), jamais de spatial, pas de diversité des individus, surtout des études de propagations de maladies. Nécessité de réaliser des requêtes annexes.
- Dominance des modèles implémentés ; quelques modèles conceptuels.
- Diversité des supports : majorité d'articles de revue à comité de lecture (parmi lesquelles *Agricultural Systems* : plus de 60 références), communications à des congrès, quelques synthèses bibliographiques, rapports d'études méthodologiques et thèses.

Annexe 2 : caractéristiques de certains modèles implémentés

Auteurs	Année	Pays ou région	Elevage	Problématique principale	
Antle Capalbo	2001	EU	plusieurs	processus économétrique en articulation avec biotechnique	simulation empirique
Baumont, Dumont, <i>et al.</i>	2006	France	bovin allaitant	interactions troupeau-ressources herbacées	simulation multi-agents
Bernet, Ortiz, <i>et al.</i>	2001	Pérou	plusieurs	stratégies de production animales et végétales pour maximiser les revenus	Optimisation par programmation linéaire
Beukes, Cowling, <i>et al.</i>	2002	Afrique du Sud	ovin viande	durabilité économique et écologique d'une infrastructure en paddocks	simulation empirique
Bonauto, Bommel <i>et al.</i>	2005	Brésil	bovin	Modélisation des fronts pionniers de la Transamazonienne	Simulation multi-agents
Bontkes Van Keulen	2003	Mali	plusieurs	développement agricole échelle EA et région	simulation déterministe
Bosman, Avantunde, <i>et al.</i>	1997	Nigeria	Caprin	productivité des élevages caprins	simulation stochastique
Brereton Holden	2005	Europe	bovin	pâturage : système rotationnel	simulation mécaniste
Buvsse Van Huvlenbroek	2005	UK	bovin laitier	alimentation du troupeau et coût énergétique	Optimisation par programmation linéaire
Cabrera Breuer	2005	EU	bovin laitier	lessivage de l'azote et rentabilité	simulation stochastique, déterministe et programmation linéaire
Cacho Finlavson	1995	Nouvelle Zélande	ovin viande	pâturage des ovins	simulation déterministe
Castelan-Ortega Fawcett	2003	Mexique	système araire	fonctionnement des systèmes et interaction fermier et production végétales et animales	simulation empirique et programmation mathématique
Chadon, Riolo <i>et al.</i>	2007	France	bovin laitier et porcin	stratégies de gestion et dynamiques d'éléments nutritifs à l'échelle de l'exploitation	Simulation déterministe et stochastique
Coleno Duru	1999	France	bovin laitier	évaluation de stratégies de gestion du système fourrager	simulation déterministe
Coquil, Faverdin <i>et al.</i>	2005	France	bovin laitier	variations intra-annuels d'effectifs d'un troupeau et flux	simulation mécaniste
Costa Rehman	2005	Brésil	bovin allaitant	chargement/surpâturage : performance : dégradation des prairies	optimisation bicritère
Cournut	2001	France	ovin viande	fonctionnement du troupeau	simulation stochastique
Cros Duru	2001	France	bovin laitier	gestion du pâturage rotationnel	simulation empirique à événements discrets
Crosson Okielv	2006	Irlande	bovin allaitant	gestion des prairies	Optimisation par programmation linéaire
Depigny	2007	France	bovin laitier	impacts paysagers des pratiques agricoles	simulation ?
Diaz Solis	2003	Mexique	bovin allaitant vache-	chargement/alimentation	simulation mathématique
Donnelly Freer Moore	1997	Australie	ovin viande	durabilité économique et écologique	simulation déterministe et empirique + programmation linéaire
Ezanno	2005	Tropiques	?	gestion de la production d'un troupeau	simulation déterministe
Finlavson Cacho	1995	Nouvelle Zélande	ovin viande	pâturage	simulation mécaniste
Fitzgerald Brereton	2005	Irlande	bovin laitier	impact climatique sur la gestion des systèmes bovins laitiers	simulation empirique
Garcia, Faverdin, <i>et al.</i>	2005	France	bovin laitier	assolements	Optimisation par programmation linéaire multi-critère
Guerrin	2001	Réunion	bovin	gestion des effluents	simulation mécaniste
Guevara, Silva Colomer, <i>et al.</i>	2003	Argentine	Caprin	faisabilité économique d'une complémentation fourragère (schrubs)	simulation stochastique
Guimaraes Madalena	2006	Brésil	bovin allaitant et laitier	retombées économiques	simulation déterministe
Harv	2004	Allemagne	tous	structure du troupeau et stratégies de réforme	simulation déterministe avec matrices
Herrero Fawcett	1999	Costa Rica	bovin laitier	combinaison de ressources	programmation linéaire + simulation
Hervé Genin	2002	Andes	plusieurs	activité agropastorale	simulation déterministe
Ingrand Dedieu	2002	France	bovin allaitant	gestion du troupeau	multi-agents
Janssen, Anderies <i>et al.</i>	2002	Australie	ovin	Stratégies de gestion face à l'aléa climatique	Optimisation
Janssen, Walker <i>et al.</i>	2000	Australie	Ovin	Stratégies de gestion et influences des politiques sur les systèmes de parcours	Simulation multi-agents
Joraensen Kristensen	1995		porcin	importance des flux d'information dans les performances	
Jouven Carrere	2006	France	bovins	diversité infraparcellaire et pâturage	simulation mécaniste
Kaine Tozer	2005	Nouvelle Zélande	bovin allaitant	stabilité, résilience et durabilité des systèmes	simulation
Keating Carberrv <i>et al.</i>	2002	Australie	plusieurs	assolements et impacts sur les sols	plate-forme de simulation
Kristensen Sorensen	1997	Danemark	bovin laitier	intensité de pâturage et production laitière	simulation stochastique
Lansink Van Den Berg	2003	Pays Bas	porcin	projets stratégiques	simulation empirique
Lesnoff	1999	Sénégal	ovin viande	démographie d'un troupeau ovin par rapport aux variations environnementales intra-annuelles	simulation déterministe
Louhichi Alarv	2004	Réunion	bovin laitier	articulation socio-économie et biotechnique	Optimisation par programmation linéaire
Matthews Wright	2006	Pays de Galles	allaitant	impact de la réforme PAC sur ces systèmes	simulation empirique et mécaniste
Mc Allister, Gross <i>et al.</i>	2005	Australie	Ovin	Analyse des facteurs qui induisent les changements de structure spatiale des pâturages extensifs de la savane	Simulation multi-agents
Meot Hubert	2003	France	bovin	rôle de la végétation dans les décisions de gestion du pâturage	simulation déterministe
Milner-Guland, Kerven <i>et al.</i>	2006	Kazakhstan	Ovin viande	options de gestion de la richesse entre capitaux et troupeau	simulation multi-agents
Mohtar Zhai	2000	EU	plusieurs	gestion du système fourrager	simulation mécaniste
Morales Grosskopf	2007	Uruquav	bovin	Conséquences de différentes stratégies d'éleveurs	Simulation multi-agents
Nielsen Kristensen	2004	Danemark	bovin allaitant	niveau d'alimentation, stratégie de pâturage et réforme	programmation dynamique + chaîne de Markov
Orewe Indetie	2006	Kenya	bovin	projet d'élevage	simulation déterministe+programmation linéaire
Parsons, Armstrong <i>et al.</i>	2001	UK	bovin et ovin	impacts des changements climatiques sur les systèmes d'élevage	simulation déterministe
Pfister Bader	2005	Nicaragua	système araire	fonctionnement des systèmes du Nicaragua	simulation
Plà <i>et al.</i>	2003	Espagne	porcin	productivité des élevages	simulation stochastique (Markov)
Plà <i>et al.</i>	1998	Espagne	porcin	fonctionnement	simulation stochastique et programmation linéaire
Pleasants Wake	1997	Nouvelle Zélande	plusieurs	représenter l'aléa dans les systèmes de pâture	simulation stochastique (équations différentielles)
Romera Morris	2004	Argentine	bovin allaitant	évolution sur le long terme des systèmes	?
Rotz Mertens	1999	EU	bovin laitier	balance ingestion-performances	Optimisation par programmation linéaire + simulation
Rotz Zartman	2005	EU	bovin laitier	faisabilité économique de la production de lait sans tarissement	?
Salinas, Ramirez, <i>et al.</i>	1999	Mexique	Caprin	analyse économique des systèmes chèvre-cultures	Optimisation par programmation linéaire
Shallo Dillon	2004	Irlande	bovin laitier	interactions pâturage et sol + précipitations	simulation stochastique
Teaque Fov	2002	EU	bovin allaitant	gestion de l'écosystème prairie	simulation déterministe
Thornton Galvin	2003	Tanzanie	plusieurs	impacts socio-économiques de stratégies de gestion	?
Tseveenjav, Garrick, <i>et al.</i>	2006	Mongolie	Caprin	stratégies d'alimentation et qualité de la laine	simulation déterministe
Van Calker, Berentsen, <i>et al.</i>	2004	Pays Bas	bovin laitier	durabilité économique et écologique par rapport à de nouvelles mesures	Optimisation par programmation linéaire et simulation empirique
Vevsset Bebin	2005	France MC	bovin allaitant	adaptabilité des systèmes aux réformes	programmation linéaire
Villalba Casasus	2006	Espagne	bovin allaitant	lien entre alimentation et réponse de production	simulation stochastique
Wolfova Wolf	2005	Tchéquie	bovin allaitant	projet d'élevage	simulation stochastique (Markov)
Woodward Wake	1995	Nouvelle Zélande	bovin laitier	gestion du pâturage rotationnel pendant période où pousse est inférieure à capacité d'ingestion	Optimisation par programmation linéaire
Yates Rehman	1998	UK	bovin laitier	Renouvellement du troupeau	simulation stochastique (Markov) + programmation linéaire