THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par l'Institut National Polytechnique de Toulouse
Discipline: Agronomie

Présentée et soutenue par
Guillaume Martin
Le 9 novembre 2009

ANALYSE ET CONCEPTION DE SYSTÈMES FOURRAGERS FLEXIBLES PAR MODÉLISATION SYSTÉMIQUE ET SIMULATION DYNAMIQUE

JURY

Benoît Dedieu	*Directeur de recherche INRA SAD*	*Rapporteur*
Gilles Lemaire	*Directeur de recherche INRA EA*	*Rapporteur*
Marc Tchamitchian	*Chargé de recherche HDR INRA SAD*	*Rapporteur*
Jean-Baptiste Coulon	*Directeur de recherche INRA PHASE*	*Examinateur*
Jean-Marc Meynard	*Directeur de recherche INRA SAD*	*Examinateur*
Michel Duru	*Directeur de recherche INRA EA/SAD*	*Codirecteur de thèse*
Roger Martin-Clouaire	*Directeur de recherche INRA MIA*	*Codirecteur de thèse*

Ecole doctorale SEVAB
Unités de recherche :
UMR INRA/INPT-ENSAT 1248 AGrosystèmes et développement terrItoRial
UR INRA 875 Biométrie et Intelligence Artificielle
Directeurs de Thèse : Michel Duru & Roger Martin-Clouaire

THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par l'Institut National Polytechnique de Toulouse
Discipline: Agronomie

Présentée et soutenue par
Guillaume Martin
Le 9 novembre 2009

ANALYSE ET CONCEPTION DE SYSTÈMES FOURRAGERS FLEXIBLES PAR MODÉLISATION SYSTÉMIQUE ET SIMULATION DYNAMIQUE

JURY

Benoît Dedieu	*Directeur de recherche INRA SAD*	*Rapporteur*
Gilles Lemaire	*Directeur de recherche INRA EA*	*Rapporteur*
Marc Tchamitchian	*Chargé de recherche HDR INRA SAD*	*Rapporteur*
Jean-Baptiste Coulon	*Directeur de recherche INRA PHASE*	*Examinateur*
Jean-Marc Meynard	*Directeur de recherche INRA SAD*	*Examinateur*
Michel Duru	*Directeur de recherche INRA EA/SAD*	*Codirecteur de thèse*
Roger Martin-Clouaire	*Directeur de recherche INRA MIA*	*Codirecteur de thèse*

Ecole doctorale SEVAB
Unités de recherche :
UMR INRA/INPT-ENSAT 1248 AGrosystèmes et développement terrItoRial
UR INRA 875 Biométrie et Intelligence Artificielle
Directeurs de Thèse : Michel Duru & Roger Martin-Clouaire

Remerciements

Au cours de ces presque trois années, nombreuses sont les personnes dont j'ai croisé la route. Elles ont su, au travers de discussions régulières ou d'échanges plus ponctuels, partager leurs connaissances, leurs savoirs-faire, leur enthousiasme, leur bonne humeur et faire de cette thèse une vraie aventure collective. J'espère qu'elles y ont pris autant de plaisir que moi.

Mes premiers et chaleureux remerciements s'adressent au quatuor le plus sollicité, le Chet Baker des systèmes fourragers, le Walter Bonatti de la modélisation, le Maradona du C++ et le John Travolta des suivis d'élevage.



Michel Duru et Roger Martin Clouaire, codirecteurs de thèse dans des styles très différents et complémentaires, m'ont fait bénéficier d'un encadrement en « liberté surveillée » hautement appréciable, me permettant d'aller au terme de mes différentes explorations et de mes divers projets, non sans me guider au cours de discussions toujours éclairantes. C'est donc en premier lieu pour vos qualités de formateurs à la recherche que je vous remercie. A cela s'ajoutent de grandes qualités humaines matérialisées par une bonne dose d'humilité, de perpétuels encouragements, et un enthousiasme, une ferveur et une pugnacité qui font que chaque fois que le doute s'installe, un détour par vos bureaux permet d'en ressortir plus convaincus et regonflés que jamais. Je vous en suis d'autant plus reconnaissant que vos responsabilités, entre autres vos directions d'unités respectives, n'ont jamais empiété sur la fréquence ni sur la qualité de nos échanges. J'espère que nous aurons l'occasion de poursuivre ces interactions fécondes.

Il incombait à Jean-Pierre Rellier la lourde et ambitieuse tâche de m'initier aux joies de la modélisation informatique. Merci pour ta patience au cours de ma longue et hésitante initiation, également pour m'avoir aidé, de par ta riche expérience, à prendre du recul sur

mon travail. Enfin, je te remercie d'avoir été l'interlocuteur qui ne discute pas de foot avec la pelouse comme clé d'entrée.

Dans ce travail de modélisation, Jean-Pierre Theau a assuré mon lien avec le terrain et bien plus, me permettant de garder au moins un pied hors de l'élevage virtuel et informatisé. Je te remercie Jean-Pierre pour avoir mis de côté tes réserves initiales sur ce type de démarche, et m'avoir communiqué avec une grande gentillesse et une passion contagieuse ton regard expert sur l'élevage et les prairies, pour m'avoir mis à disposition des années de récolte de données, et pour nous avoir introduit et ainsi fait bénéficier de ton crédit auprès des éleveurs.

Outre ce quatuor, je remercie les personnes sollicitées de façon plus ponctuelles mais dont la contribution à ce travail a été très significative, toujours éclairante, parfois salvatrice.

Merci donc à Gérard Balent, Justine Carré, Pablo Cruz, Robert Faivre, Philippe Fleury, Sylvie Granger, Laure Hossard, Etienne Josien, Claire Jouany, Sandra Lavorel et Marie-Angélina Magne tous contributeurs et donc cosignataires d'au moins un des articles de cette thèse. Mention particulière à l'un d'entre eux, Olivier Therond, pour tes conseils avisés, tes encouragements et ton enthousiasme à l'égard de mon travail.

Je remercie également les membres de mon comité de thèse, Stéphane Ingrand, Etienne Josien et Eric Pottier qui m'ont donné à deux reprises l'occasion d'exposer l'avancée de ma thèse afin de s'assurer de son bon déroulement. Grâce à Eric Pottier, j'ai également eu l'opportunité de présenter mes travaux à l'équipe Systèmes Fourragers de l'Institut de l'Elevage dont je remercie les membres pour le temps qu'ils ont bien voulu m'accorder.

Ma thèse s'insérait dans plusieurs projets (ANR ADD TRANS, ANR VMC VALIDATE, PSDR Climfourrel). Merci à leurs coordinateurs et participants pour les échanges éclairants que nous avons eus. Je remercie également les organisateurs et participants des séminaires Réflexives® et MODELISAD, des Ateliers Pratiques Recherche Participative, et de la mission Systèmes Fourragers Innovants. J'ai pu, à travers ces diverses expériences, affiner ma perception du métier de chercheur et ma compréhension des enjeux scientifiques de mon domaine de recherche dans une ambiance conviviale et constructive. Je remercie enfin les éleveurs impliqués dans ce travail, bien que je ne les aie que trop peu fréquentés, pour nos interactions fructueuses et enthousiasmantes.

A cheval sur deux unités de recherche et donc deux équipes, j'ai pris le parti d'éviter la schizophrénie en passant le plus clair de mon temps dans l'unité de ma discipline d'ancrage, l'agronomie. Je remercie donc d'abord le personnel de l'UMR AGIR, tout particulièrement l'équipe ORPHEE pour m'avoir placé dans une ambiance de travail aussi favorable, et les

équipes administrative et informatique pour avoir pris en charge mon aversion pour les questions administratives et informatiques avec beaucoup de gentillesse et de bonne humeur. Je n'oublie pas le personnel de l'UBIAT, et principalement l'équipe MAD. Merci en particulier à Fred Garcia pour ton choix voici trois ans lors du concours ASC, et pour, lors de ce concours, avoir eu ces quelques mots de réconfort qui m'avaient libéré. Enfin, un grand merci à la communauté de doctorants et CDD de l'UMR AGIR (Lucie Claveouh, Gipsy SGuillaume, Clémentine CAlline, Jérôme JDury, Laurent LBedou, Anaïs, Cécile Sesseau, Toky, Pierre, Héloïse, Matthieu, et tous les autres) pour les bons moments passés ensemble.

Benoît Dedieu, Gilles Lemaire et Marc Tchamitchian m'ont fait l'honneur d'être les rapporteurs de ce travail. Je suis très reconnaissant envers Jean-Baptiste Coulon et Jean-Marc Meynard qui se sont joints à ce trio pour me faire partager leurs avis sur mon travail lors du jury de soutenance de thèse. Cet après-midi en leur compagnie fut un moment agréable et précieux. Merci encore d'en avoir été, et de m'avoir tous fait l'honneur de souligner le plaisir que vous aviez à être de ce jury.

Je n'aurais sans doute jamais entrepris cette thèse sans mon expérience de Master à cheval sur l'Uruguay et la Hollande. Un grand merci donc à Martin van Ittersum, Cees Leeuwis, Santiago Dogliotti et Barbara Sterk qui m'ont transmis le virus en m'initiant aux démarches de conception de systèmes agricoles et qui m'ont encouragé à poursuivre dans cette voie.

Enfin, je ne remercierai jamais assez

mes amis (Le Bab et Cruchot, Bernie, Borry le véndéen et Solenn, Bross et Le Monégasque, Coramie, JPP et Marie, Lucie Claveouh, Yanou et Gipsy SGuillaume, etc.) pour m'avoir offert de plaisants et salutaires répits entre deux surchauffes cérébrales,

ma belle-famille et Michka pour leurs encouragements,

ma famille pour son amour et son soutien de toujours,

Lise pour m'avoir empreint de sérénité au cours de ces trois années, et pour tant d'autres choses qu'il me semble impossible de les énumérer ni de les représenter avec des...

Table des matières

1. INTRODUCTION GÉNÉRALE 13

1.1. De la nécessaire conception de systèmes agricoles innovants 13
1.2. Une conception assistée par la modélisation systémique et la simulation dynamique 14
1.3. Le cas des systèmes fourragers herbagers 16
1.4. Objectif et conditions de la recherche 17
1.5. Plan de la thèse 18

2. PRÉSENTATION DU PROJET DE THÈSE 19

2.1. Éléments d'analyse sur le système fourrager 19
2.1.1. Éléments constitutifs et interactions 19
2.1.2. Configuration du système fourrager 20
2.1.3. Planification et coordination sous incertitude des actes techniques 22
2.1.4. Conséquences de la variabilité climatique sur le système fourrager 24
2.1.5. Enjeux scientifiques sur l'analyse des systèmes fourragers 25
2.2. Diversité végétale, animale et du territoire d'exploitation au sein des systèmes herbagers 25
2.2.1. Diversité fonctionnelle végétale 26
2.2.2. Diversité du territoire d'exploitation 29
2.2.3. Diversité fonctionnelle animale 30
2.2.4. Enjeux scientifiques sur la diversité et opportunités pour des systèmes fourragers flexibles 32
2.3. Les modèles de système d'élevage 33
2.3.1. Exemples de modèles de système d'élevage 33
2.3.2. Modélisation de la diversité fonctionnelle végétale et animale, et du territoire d'exploitation 36
2.3.3. Modélisation du comportement gestionnaire des éleveurs 37
2.3.4. Enjeux scientifiques sur la modélisation des systèmes d'élevage 40
2.4. Formulation du projet de thèse 41

3. DÉVELOPPEMENT DU MODÈLE DE SIMULATION SEDIVER 45

3.1. Introduction 45
3.2. A conceptual model of grassland-based livestock systems 47
Abstract 47
3.2.1. Introduction 47
3.2.2. Livestock farming as the explicit management of biophysical entities and processes 50
3.2.2.1. A systemic dynamic approach 50
3.2.2.2. The biophysical system as a set of managed entities and interacting processes 51
3.2.2.3. The manager as an explicit system that produces decisions and implements actions 52
3.2.2.4. Towards the conceptual model 53
3.2.3. A conceptual model of the biophysical system 55
3.2.3.1. Overview 55
3.2.3.2. Farmland 55
3.2.3.3. Food storage units 60
3.2.3.4. Herd 60
3.2.4. A conceptual model of the management system 61
3.2.4.1. Rationale 61
3.2.4.2. A conceptualization of production management 63
3.2.4.3. Examples of operations, primitive and composite activities and conditional adjustments 64

3.2.5. From the conceptual model to a specific farm model and its use in simulation-based design *67*
3.2.6. Concluding remarks *68*
Acknowledgements *68*
3.3. A SIMULATION MODEL TO DESIGN FLEXIBLE GRASSLAND-BASED LIVESTOCK SYSTEMS 70
Abstract *70*
3.3.1. Introduction *70*
3.3.2. A model based on an ontology of agricultural production systems *72*
3.3.2.1. Model overview 72
3.3.2.2. The ontology of agricultural production systems and the modeling framework 74
3.3.2.3. Successive steps in designing, implementing and using a model based on an ontology 77
3.3.3. Knowledge base content *78*
3.3.3.1. The model of the biophysical system 78
3.3.3.1.1. Overview 78
3.3.3.1.2. The *Farmland* module 78
3.3.3.1.3. The *FoodStorageUnitSet* module 80
3.3.3.1.4. The *Herd* module 80
3.3.3.2. The models of the decision and operating systems 81
3.3.3.2.1. An overall structure of the decision process 81
3.3.3.2.2. A structure for yearly forage stock production 82
3.3.3.2.3. A structure for yearly herd batch management 84
3.3.3.2.4. Other activity classes 87
3.3.4. An application to explore the potential for securing forage self sufficiency in French Pyrenees grassland-based beef systems *88*
3.3.4.1. Description of the experiment 88
3.3.4.1.1. General objective 88
3.3.4.1.2. Data available 89
3.3.4.1.3. Reference system description 89
3.3.4.1.4. An alternative form of management 91
3.3.4.1.5. Simulations 92
3.3.4.1.6. Evaluation of the simulations 92
3.3.4.2. Simulation results 93
3.3.4.2.1. Ability of the model to simulate the actual system behavior 93
3.3.4.2.2. Comparison of traditional and alternative management forms 94
3.3.5. Discussion and Conclusions *95*
3.3.5.1. On the evaluation of the simulation-based application 95
3.3.5.2. On the modeling approach 96
Acknowledgements *98*
4. FLEXIBILITÉ SUR L'UTILISATION DES PARCELLES EN HERBE 99
4.1. INTRODUCTION 99
4.2. CHARACTERIZING POTENTIAL FLEXIBILITY IN GRASSLAND USE. APPLICATION TO THE FRENCH AUBRAC AREA 100
Abstract *100*
4.2.1. Introduction *101*
4.2.1.1. Rationale 101
4.2.1.2. Sources of flexibility in grassland use 102
4.2.1.3. Originality and objectives of the article 103
4.2.2. Materials and Methods *103*
4.2.2.1. Design of the analysis framework 103
4.2.2.2. Application to the Aubrac region 105
4.2.2.2.1. Case study 105
4.2.2.2.2. Characterization of grassland use and of the topographic and farming constraints 106

4.2.2.2.3. Characterization of grassland community types 107
4.2.3. Results and Discussion *107*
4.2.3.1. Characterization of organizational flexibility in grassland use 107
4.2.3.2. Characterization of timing flexibility in grassland use 111
4.2.3.3. A farm-scale analysis of potential flexibility in grassland use 112
4.2.4. Conclusion *113*
Acknowledgements *115*
4.3. A MULTI-SITE STUDY TO CLASSIFY SEMI-NATURAL GRASSLAND TYPES 116
Abstract *116*
4.3.1. Introduction *117*
4.3.2. Materials and methods *119*
4.3.2.1. Data sources 119
4.3.2.2. Calculation of vegetation descriptors 122
4.3.2.3. Data processing and statistical analysis 122
4.3.3. Results *124*
4.3.3.1. Dependencies among variables 124
4.3.3.2. Responses of vegetation descriptors 125
4.3.3.3. Semi-natural grassland classification 125
4.3.4. Discussion *129*
4.3.4.1. Responses of vegetation descriptors 129
4.3.4.2. Implications for modelling 130
Acknowledgements *131*

5. APPLICATION À L'ANALYSE ET À LA CONCEPTION RÉGLÉE DE SYSTÈMES FOURRAGERS 133

5.1. INTRODUCTION 133
5.2. UNE DÉMARCHE ARTICULANT DIAGNOSTIC ET SIMULATION DE SYSTÈMES FOURRAGERS POUR ÉVALUER ET AMÉLIORER L'EFFICIENCE D'UTILISATION DE L'HERBE 134
Mise en situation *134*
Résumé *134*
5.2.1. Introduction *135*
5.2.2. Démarche de recherche *136*
5.2.2.1. Vue d'ensemble 136
5.2.2.2. Dispositif de suivi des deux systèmes 136
5.2.2.3. Analyse fonctionnelle des deux systèmes 137
5.2.2.4. Diagnostic des pratiques fourragères des éleveurs 138
5.2.2.5. Modélisation systémique et Simulation dynamique 139
5.2.3. Résultats et Discussion *140*
5.2.3.1. Analyse fonctionnelle des deux systèmes 140
5.2.3.2. Diagnostic des pratiques des éleveurs et recommandations d'alternatives 141
5.2.3.3. Evaluation de la particularisation du modèle de simulation aux deux systèmes 144
5.2.3.4. Evaluation par simulation des systèmes alternatifs traduisant les recommandations issues du diagnostic . 146
5.2.4. Conclusions *148*
5.2.4.1. Des marges d'amélioration limitées pour les deux systèmes 148
5.2.4.2. Une démarche originale pour l'analyse et la conception de systèmes fourragers herbagers 149
Remerciements *150*

6. DISCUSSION GÉNÉRALE 151

6.1. BILAN DU TRAVAIL RÉALISÉ DANS CE PROJET DE THÈSE 151
6.2. UNE DÉMARCHE DE MODÉLISATION ET DE SIMULATION POUR CONDUIRE DES RECHERCHES FINALISÉES .. 152
6.2.1. Intérêt de la démarche proposée pour la conception réglée de systèmes fourragers *152*

6.2.2. La conception de systèmes agricoles, lien entre science et pratique 153
6.2.3. La conception de systèmes agricoles pour renforcer les capacités adaptatives des acteurs 155
6.3. VERS LA CONCEPTION DE SYSTÈMES AGRICOLES EN RUPTURE 158
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES 161

« La folie, c'est se comporter de la même manière et s'attendre à un résultat différent. »

Albert Einstein

« Pour contrôler un système donné, il faut disposer d'un contrôle dont la variété est au moins égale à la variété de ce système. »

William R. Ashby

« Le hasard ne favorise qu'un esprit préparé. »

Louis Pasteur

« Ce qui est simple est toujours faux. Ce qui ne l'est pas est inutilisable. »

Paul Valéry

« Si l'on avait investi dans le monde autant de moyens dans la recherche sur les régulations de l'agro-écosystème que sur l'innovation en matière de pesticides ou d'OGM, on serait certainement beaucoup plus avancés dans la mise au point de systèmes agricoles répondant aux enjeux environnementaux. »

Jean-Marc Meynard

« Parler des prairies, c'est regarder sous un autre angle la société où nous vivons, poser en même temps toutes ces questions qui se bousculent sur nos façons de manger, de penser, d'habiter, de nous reposer, de nous déplacer, de voir la ville, de rêver la campagne, et j'en passe... »

Dominique Louise Pélegrin

1. Introduction générale

1.1. De la nécessaire conception de systèmes agricoles innovants

Après la seconde guerre mondiale, afin de satisfaire une demande alimentaire croissante, l'agriculture a emprunté la voie dite du « productivisme ». C'est ainsi, par exemple, que les variétés végétales et les races animales ont été « drastiquement » sélectionnées, que l'usage des engrais et des produits phytosanitaires s'est répandu, ou que des machines ont remplacé la force de travail humaine. De même, les systèmes de production agricole, c'est-à-dire les manières de produire, d'organiser la production ou de gérer l'espace agricole à différentes échelles (Meynard et al., 2006), ont été fortement intensifiés et spécialisés. Les conditions culturales ont été adaptées à un nombre réduit d'itinéraires techniques promus à grande échelle ; ces itinéraires techniques étant supposés garantir l'expression du potentiel productif des variétés végétales et des races animales (Dufumier, 2004). A chaque problème rencontré dans le processus de production, une solution technologique était trouvée afin de sécuriser les rendements agricoles. Cette approche monolithique de la production agricole a été qualifiée de « command-and-control » (Holling et Meffe, 1996), i.e. une approche réductionniste se focalisant sur un acte technique indépendamment des autres, sur un composant du système pris isolément, sans que les conséquences sur l'ensemble du système agricole ne soient vraiment évaluées. Durant cette période, politiques, chercheurs, conseillers agricoles et agriculteurs ont pour la plupart œuvré de concert afin d'augmenter la production de biens agricoles consommables (lait, viande, etc.) ou transformables (céréales, oléagineux, etc.) par unité de surface et par travailleur. Le leitmotiv dominant pouvait alors se résumer en trois mots : rendement, stabilité, prédictibilité (Darnhofer et al., 2008).

Depuis les années 1990, et en particulier après le Sommet « planète Terre » de Rio de Janeiro en 1992, les pratiques associées à ce modèle productiviste et leurs conséquences environnementales et sanitaires néfastes n'ont cessées d'être pointées du doigt. C'est ainsi que la presse généraliste s'est fait l'écho des pollutions des eaux souterraines, des eaux de rivières et des eaux côtières associées aux activités d'élevage (Clavreul, 2007), de la concentration de polluants chimiques dans les denrées alimentaires consécutive à l'usage des produits phytosanitaires pour les productions végétales (Benkimoun, 2008), ou de la diminution de la biodiversité liée à la destruction de niches écologiques provoquée par la standardisation des conditions culturales (Minassian, 2009). Les pratiques agricoles sont donc peu à peu devenues un objet de débat public, et l'évolution vers des pratiques durables, un enjeu de société. Dans le même temps, plusieurs phénomènes (changements climatiques, volatilité des prix, accroissement du coût de l'énergie, etc.), parfois imbriqués, ont contribué à accroître l'incertitude autour du contexte mondial de la production agricole. Ces éléments

interrogent la durabilité, la robustesse et l'adaptabilité des systèmes de production agricole (Houiller, 2009).

Les leçons tirées de l'analyse du modèle productiviste appellent des approches plus systémiques et intégratives (Antle et al., 2001 ; Chevassus-au-Louis et al., 2008 ; Meynard, 2008). Elles doivent intégrer différentes composantes des systèmes agricoles (parcelle, animal, agriculteur, etc.), différents niveaux d'organisation (individu, lot d'animaux, troupeau, etc.) et différentes échelles de temps (jour, saison, année, etc.) sous l'angle de plusieurs disciplines (agronomie, écologie, zootechnie, etc.). Elles doivent considérer la coordination et les interactions entre processus biologiques et/ou actes techniques, leurs effets immédiats et différés, localisés et diffus. De telles approches sont qualifiées d'ingénierie agroécologique, car elles mobilisent des connaissances sur les processus écologiques et humains pour la résolution de problèmes agricoles pratiques. Elles doivent prendre en compte conjointement des objectifs classiques de production de biens agricoles consommables ou transformables, et des objectifs de réduction des impacts énergétiques et environnementaux, de robustesse des performances en conditions incertaines et rapidement changeantes. Il convient donc de mettre en œuvre de telles approches d'ingénierie agroécologique pour concevoir ou peut-être réinventer des systèmes agricoles, dans ce cas, flexibles, c'est-à-dire capables de garantir voire d'accroître leurs performances productives (biomasse végétale, lait, viande) et leurs services environnementaux face à ces aléas et, ce, pour une diversité d'avenirs.

1.2. Une conception assistée par la modélisation systémique et la simulation dynamique

Le terme « agroécologie » auquel se réfère l'ingénierie agroécologique est particulièrement polysémique (Wezel et al., 2009). En perpétuelle évolution depuis son émergence autour des années 1930, il se rattache, selon ces auteurs, à une discipline scientifique, à un courant de recherche, à un mouvement, ou à une pratique. Il porte sur l'étude de la parcelle cultivée, de l'exploitation agricole, ou des chaînes d'approvisionnement alimentaire. Outre la dimension de production de biens agricoles consommables ou transformables, il intègre des considérations environnementales, sociales, économiques, voire éthiques. Nous nous cantonnons dans ce document à une acception du terme « agroécologie » proche de Dalgaard et al. (2003), se référant à la discipline qui étudie l'interaction entre les activités humaines et les écosystèmes anthropisés, les agro-écosystèmes, à différents niveaux d'organisation et différentes échelles de temps. L'enjeu finalisé des recherches conduites dans ce cadre disciplinaire est la production de systèmes agricoles « situés », c'est-à-dire adaptés aux conditions environnementales locales et valorisant les ressources biologiques intrinsèques au système agricole (Altieri, 1999). Cela passe par un usage efficient et durable des processus

biologiques en œuvre au travers de techniques agronomiques adaptées, qui tirent parti des complémentarités et synergies permises par la diversité biologique (génétique, spécifique, fonctionnelle et écosystémique) des composants du système agricole dans des arrangements spatiaux et temporels appropriés. À ce titre, l'agroécologie s'inscrit parfaitement dans l'ambition de conception de systèmes agricoles flexibles.

Quatre types de démarches participent peu ou prou à la conception de systèmes agricoles : (i) le diagnostic (e.g. Doré et al., 1997), (ii) l'expérimentation systémique (e.g. Mueller et al., 2002), (iii) le prototypage (e.g. Vereijken, 1997) et (iv) la modélisation par simulation (e.g. Romera et al., 2004). Le diagnostic permet de comprendre et d'évaluer des systèmes agricoles à partir de mesures *in situ* et d'enquêtes. Il se révèle toutefois insuffisant lorsque l'on souhaite évaluer des alternatives aux systèmes observés et en caractériser les performances pour une diversité de contextes de production. C'est le rôle de l'expérimentation systémique. Celle-ci est toutefois très coûteuse en temps et en moyens et ne permet donc de tester qu'un nombre limité d'alternatives. Le prototypage se déroule en trois phases : construction à dires d'expert d'un nombre limité de systèmes agricoles satisfaisant un ensemble d'objectifs dans une gamme de contraintes, expérimentation de ces systèmes, et à partir de l'évaluation de leurs performances, adaptation des prototypes qui entraînent de nouvelles expérimentations, etc. Si ce type de démarche ouvre des perspectives séduisantes, les capacités de traitement et d'interprétation de données par des humains restent limitées, et le temps nécessaire pour l'expérimentation est important. Elle ne permet donc pas d'évaluer rapidement les systèmes agricoles conçus pour une diversité de contextes de production. La modélisation consiste à concevoir une abstraction simplifiée d'un système réel. La simulation se charge ensuite de faire évoluer l'état de cette abstraction au cours du temps afin de comprendre son fonctionnement et son comportement (Coquillard et Hill, 1996). La modélisation par simulation, parce qu'elle bénéficie des développements issus de l'informatique, permet de représenter de manière réaliste le comportement de systèmes complexes, et de générer et de gérer d'importants volumes de données. Il est alors possible d'explorer rapidement et à moindre coût les performances d'une diversité de systèmes agricoles, pour une diversité de contextes de production, et d'identifier leurs propriétés émergentes. Dans le cadre de l'ingénierie agroécologique, la complexité et le nombre des interactions dynamiques entre processus biologiques et/ou actes techniques à intégrer, ainsi que la diversité des niveaux d'organisation et des pas de temps, conduisent logiquement au choix de la modélisation systémique et de la simulation dynamique.

March (1991) et Le Masson et al. (2006 cités par Meynard et al., 2006) opèrent des distinctions similaires sur la nature des démarches de conception : exploitation et exploration pour le premier, et conception réglée et conception innovante pour les seconds. La modélisation par simulation est utilisable pour chacun des deux types de conception. Dans la conception

réglée ou l'exploitation, l'objectif est d'améliorer les systèmes existants pour qu'ils satisfassent de nouveaux objectifs clairement identifiés, par exemple une meilleure utilisation des ressources biologiques du système agricole. Dans ce cas, la démarche de modélisation suppose de disposer de connaissances ad hoc sur le fonctionnement des agro-écosystèmes, en particulier sur les processus biologiques, les comportements gestionnaires des agriculteurs et leurs interactions, pour enrichir les cadres d'analyse existants, pour concevoir de nouveaux systèmes, et pour valider ces systèmes conçus. Ces compétences et ces connaissances sont en général disponibles dans la recherche, ou peuvent faire l'objet d'un partenariat avec des organismes de développement. La conception innovante ou l'exploration s'appliquent aux situations pour lesquelles les objectifs de la conception restent plus flous compte tenu de l'incertitude supérieure qui pèse sur l'activité de conception par rapport à un cadre de conception réglée. La remise en cause éventuelle des cadres d'analyse traditionnellement utilisés, ou la prise en compte de nouveaux objectifs autour desquels peu de compétences et de connaissances sont disponibles invitent à des démarches de conception adaptables, plus ouvertes, plus pluridisciplinaires, et plus collectives qu'en régime de conception réglée.

1.3. Le cas des systèmes fourragers herbagers

Au sein d'une ferme dédiée à l'élevage, le système fourrager peut être défini comme l'ensemble organisé des moyens de production (surfaces, espèces et variétés végétales, etc.), des processus biologiques, des processus décisionnels et des actes techniques destinés à produire de la biomasse végétale pour l'alimentation des herbivores (adapté de Duru et al., 1988). Les systèmes fourragers s'appuient sur une diversité de types de couverts végétaux (cultures, prairies temporaires, prairies permanentes, parcours). Selon la région, une diversité de couverts végétaux plus ou moins grande est mobilisée au sein d'un même élevage. Les fermes d'élevage au sein desquelles les systèmes fourragers reposent sur des prairies temporaires, des prairies permanentes (ou semi-naturelles) plurispécifiques et des parcours sont également appelés systèmes herbagers. Dans les zones de montagne, ils se caractérisent par de fortes contraintes climatiques (hivers longs, gelées tardives), topologiques (morcellement des parcellaires), et topographiques (fortes pentes) qui limitent les quantités d'herbe récoltables par la fauche et le pâturage, et les modifications sur les modalités d'utilisation de l'espace par la fauche ou le pâturage. Ces contraintes accroissent donc indirectement les risques de ruptures alimentaires en cas d'évènements climatiques défavorables tels que des hivers longs. En outre, ces systèmes herbagers de montagne restent fortement tributaires des subventions. Il est donc essentiel de renforcer leur durabilité, vue ici sous l'angle de la viabilité, leur robustesse et leur adaptabilité.

Les systèmes fourragers herbagers des zones de montagne se caractérisent par une diversité

au sein du territoire d'exploitation résultant de différences inter-parcelles topographiques, i.e. d'altitude, d'exposition, ou de type de sol, etc. et topologiques, i.e. distance de la parcelle à l'étable, distance entre parcelles, etc. (Andrieu et al., 2007a ; Brunschwig et al., 2006). Les différences topographiques induisent une diversité de pédoclimats entre parcelles. Même si les systèmes fourragers herbagers des zones de montagne ne reposent que sur un voire deux types de couverts végétaux, ils renferment une diversité biologique de végétations intra- et inter-parcelles (Duru et al., 2005). Enfin, les troupeaux et les lots d'animaux qui s'alimentent avec ces parcelles en herbe pour base, incluent une diversité biologique animale (Ingrand et al., 2003 ; Tichit et al., 2004). Les systèmes fourragers herbagers des zones de montagne constituent donc un terrain privilégié pour l'exploration d'une valorisation de la diversité biologique végétale et animale, et du territoire d'exploitation, avec une démarche de modélisation systémique et simulation dynamique.

1.4. Objectif et conditions de la recherche

L'objet d'étude de cette thèse est le système fourrager des systèmes herbagers de montagne. **L'objectif de cette thèse est de proposer une démarche de modélisation systémique et de simulation dynamique permettant d'étudier une large gamme de systèmes fourragers herbagers sous différents contextes de production. Cette démarche est destinée à faciliter l'analyse de systèmes fourragers herbagers et, dans le cadre de cette recherche, la conception réglée de systèmes fourragers flexibles, valorisant la diversité biologique végétale et animale, et du territoire d'exploitation.** L'enjeu finalisé de cette thèse est de produire des connaissances sur les façons dont les éleveurs gèrent leurs systèmes fourragers, et sur de nouvelles façons de les gérer, mais pas de produire des systèmes livrables clés en main. En effet, ces connaissances sont destinées à susciter le débat ou à enrichir les réflexions collectives, dans une perspective d'apprentissage des chercheurs, des partenaires du développement, voire des éleveurs (McCown, 2002a ; Sterk et al., 2006 ; van Paassen et al., 2007 ; Woodward et al., 2008).

Ce projet a fait intervenir des chercheurs de trois départements de l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) : des agronomes du département Environnement et Agronomie (EA), des agronomes et des zootechniciens du département Sciences pour l'Action et le Développement (SAD), et des chercheurs en intelligence artificielle du département Mathématiques et Intelligence Artificielle (MIA). Il s'inscrit dans une collaboration durable entre les équipes ORPHEE (Outils, Références et modèles Pour la gestion des systèmes HErbagErs) de l'Unité Mixte de Recherche AGIR (AGrosystèmes et développement terrItoRial), et MAD (Modélisation des Agroécosystèmes et Décision) de l'Unité de Recherches UBIA (Unité de Biométrie et Intelligence Artificielle). L'équipe ORPHEE produit des connaissances pour la conception de systèmes techniques dans des

systèmes d'élevage herbagers. L'équipe MAD développe des modèles et des méthodes pour modéliser et simuler les agro-écosystèmes dont les processus de décision. Ensemble, ces deux équipes ont une expérience de développement de modèles de simulation pour la conception de systèmes fourragers (Cros et al., 1997, 2001, 2003, 2004). Ce projet de thèse est né de leur volonté d'intégrer leurs récentes avancées scientifiques respectives dans un nouveau modèle de simulation. Ce projet de thèse s'est inscrit dans le cadre de deux projets financés par l'Agence Nationale de la Recherche, le projet Agriculture et Développement Durable TRANS (Transformations de l'élevage et dynamiques des espaces) et le projet Vulnérabilité, Milieux et Climat VALIDATE (Vulnérabilité des prairies et des élevages au changement climatique et aux évènements extrêmes).

1.5. Plan de la thèse

Ce document se structure en cinq chapitres dont les sections s'appuient sur cinq articles publiés (Sections 4.2. et 4.3.) ou soumis et en cours d'évaluation (Sections 3.2., 3.3. et 5.2.). Le Chapitre 2, résultat de la phase d'acquisition de connaissances sur l'objet de recherche et les modèles de simulation existants, précise les éléments clés énoncés dans l'introduction, replace ce travail dans son contexte scientifique, et conduit à l'explicitation de la thèse défendue et de la démarche de recherche empruntée. Le développement du modèle de simulation au cœur de la démarche proposée, et son application à l'analyse et à la conception réglée de systèmes fourragers flexibles sont l'objet du Chapitre 3. Le Chapitre 4 présente deux travaux rendus nécessaires par le développement de ce modèle et de la démarche, et conduits en parallèle. Le Chapitre 5 traite d'une application de la démarche de modélisation systémique et de simulation dynamique ainsi développée à l'analyse et à la conception réglée de systèmes fourragers. Enfin, le Chapitre 6 dresse un bilan de ce travail, et discute ses intérêts et ses limites, ainsi que les perspectives qui y sont associées.

2. Présentation du projet de thèse

2.1. Éléments d'analyse sur le système fourrager

2.1.1. Éléments constitutifs et interactions

En introduction, nous avons proposé une définition adaptée de Duru et al. (1988) du système fourrager, vu comme l'ensemble organisé des moyens de production (surfaces, espèces et variétés végétales, etc.), des processus biologiques, des processus décisionnels et des actes techniques destinés à produire de la biomasse végétale pour l'alimentation des herbivores (Fig. 1). Les flux de biomasse végétale (production fourragère, récolte, stockage, distribution, etc.) actionnés ou non par une intervention humaine, sont au cœur de cette définition. L'état du système fourrager est modifié par deux grands types de flux : les premiers concernent la production de fourrages et incluent éventuellement leur transformation, les seconds, leur consommation sur la parcelle ou après transformation. Le système fourrager est donc composé d'un ensemble de moyens de production, en interaction directe ou indirecte, au travers de ces flux de biomasse végétale en particulier (Fig. 1). Ces composants sont le siège de processus biologiques, que l'éleveur tente de réguler au moyen d'actes techniques mis en œuvre suite à des décisions prises à l'issue de processus décisionnels.

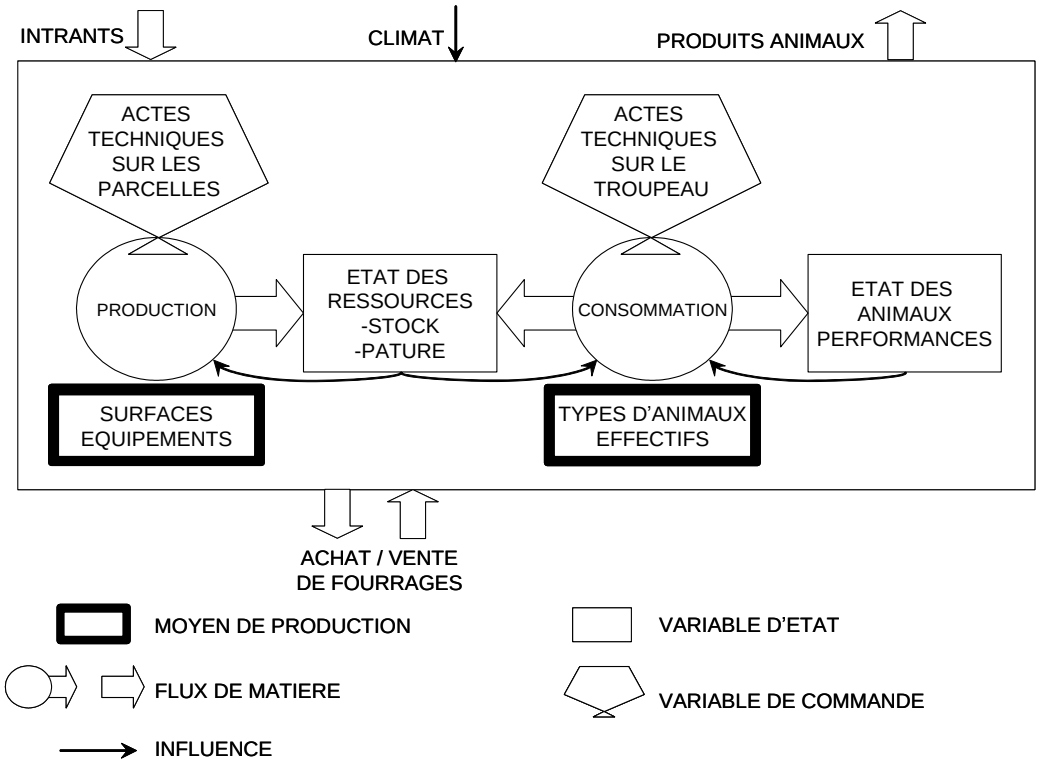


Figure 1 : Représentation du système fourrager : facteurs conditionnant les flux et les états (adapté de Duru et al., 1988).

Les parcelles en herbe, qu'ils s'agissent de prairies ou de parcours, sont les composants de base du système fourrager. Ces parcelles ont des caractéristiques topographiques et par conséquent pédoclimatiques, et topologiques qui leur sont propres (Andrieu et al., 2007a, 2007b). Elles incluent des communautés végétales qui peuvent être très différentes entre parcelles (Duru et al., 2005). L'ensemble de ces caractéristiques conduit à une grande hétérogénéité des processus biologiques en œuvre sur ces parcelles. C'est ainsi que la quantité et la qualité (valeur nutritive) des fourrages disponibles sur les parcelles sont très variables dans l'espace (entre parcelles) et dans le temps (Parsons, 1988). Ces caractéristiques sont également très liées à la variabilité climatique intra- et interannuelle (Parsons, 1988 ; Pleasants et al., 1995). Le troupeau est considéré comme partie intégrante du système fourrager (Fig. 1), vu sous l'angle d'un flux de consommation de biomasse végétale prélevée sur la parcelle ou distribuée après transformation. Le troupeau correspond à un ensemble d'animaux différant selon leur race, leur âge, leur sexe, leur période de reproduction, leur état corporel, leur fonction de production ou leurs performances escomptées e.g. un poids ou un état corporel (Dulphy et al., 1995). Cet ensemble de facteurs détermine également des périodes d'alimentation au sein desquelles le niveau de besoins alimentaires pour un animal est homogène. Les besoins alimentaires des animaux varient donc selon ces périodes et le type d'animal concerné. Malgré la recommandation de Voisin (1957) : « Ne jamais oublier l'animal quand nous étudions l'herbe », peu de travaux français ou internationaux s'intéressent conjointement aux processus biologiques végétaux et animaux à l'échelle du système fourrager, et aux conséquences de la diversité biologique végétale intra- et inter-parcelles et animale intra- et inter-lots d'animaux, et du territoire d'exploitation sur ces processus. Les travaux de même nature conduits à l'échelle de la parcelle sont plus nombreux.

2.1.2. Configuration du système fourrager

En tant que gestionnaire, l'éleveur prend des décisions de configuration du système fourrager (Fig. 2), c'est-à-dire qu'il construit des combinaisons spatio-temporelles de moyens de production qui aboutissent à des ensembles élémentaires ou sous-systèmes (Aubry et al., 1998). Par exemple, l'éleveur alloue des surfaces à des usages en assignant un groupe de parcelles en herbe à un lot d'animaux pâturant pour assurer la mise en reproduction des femelles au sein d'une période déterminée. Bellon et al. (1999) proposent de nommer ces ensembles élémentaires saisons-pratiques. Coléno et Duru (2005) suggèrent la notion voisine d'ateliers de production. Dans chaque cas, il s'agit d'une entité fonctionnelle à laquelle est assignée un objectif de production particulier. L'éleveur mobilise pour cela un sous-ensemble de moyens de production avec lesquels il effectue un ensemble coordonné d'actes techniques, décidés à partir de savoirs-comprendre spécifiques, et exécutés sur la base de

savoirs-faire spécifiques issus d'expériences antérieures (Hatchuel et Weil, 1992). C'est ainsi que les ateliers (ou les saisons-pratiques) « pâturage des génisses au printemps » et « fauche » se caractérisent par des différences sur :

- des objectifs de production : alimenter un lot au pâturage sur une période avec une herbe en quantité et de qualité pour assurer la réalisation des performances zootechniques ciblées vs. récolter de l'herbe pour une utilisation ultérieure ;
- des savoirs-comprendre : analyser des informations sur la disponibilité de l'herbe pâturable/pâturée par rapport aux besoins du lot pâturant vs. analyser des informations sur le stade phénologique de l'herbe ;
- des savoirs-faire : modalités des déplacements d'un lot d'animaux au pâturage vs. modalités des tâches à réaliser : faucher, faner, presser puis stocker ;
- des actes techniques : déplacements d'un lot d'animaux au pâturage vs. faucher, faner, presser puis stocker.

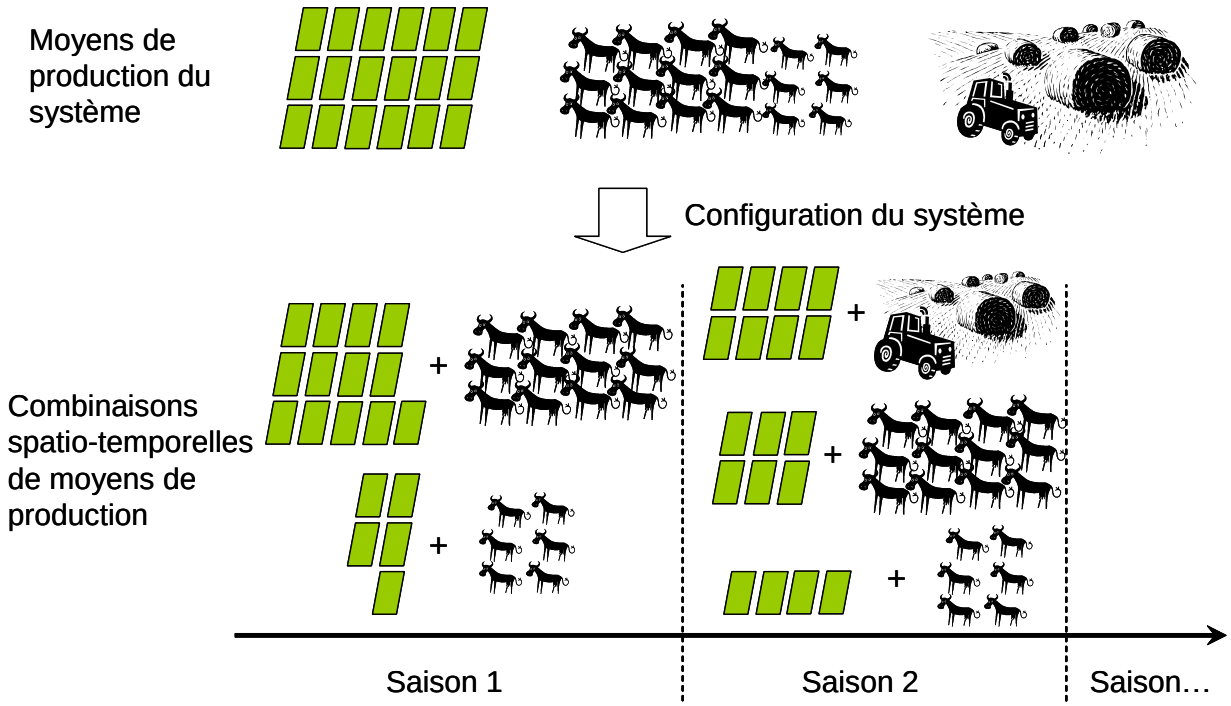


Figure 2 : Représentation schématique des décisions de configuration du système fourrager au cours du temps i.e. de la réalisation de combinaisons spatio-temporelles de moyens de productions, dans ce cas, des surfaces, des animaux et du matériel pour récolter les fourrages.

Ces ensembles élémentaires ou sous-systèmes, même s'ils sont gérés de façon quasi-indépendante au quotidien, partagent certains moyens de production (Fig. 2), e.g. du matériel, de la main d'œuvre. Ils sont fortement interdépendants à l'échelle du cycle de production, notamment parce que des flux de biomasse végétale ont cours entre ateliers. Par

exemple, le foin récolté dans l'atelier « fauche » est consommé par les animaux durant l'atelier « hivernage ». Configurer ces ensembles élémentaires revient donc à décider d'une tension sur la gestion des flux (Coléno et Duru, 2005), en choisissant si la transformation de l'herbe ou sa consommation par les animaux suivent sa production ou sont au contraire différées, et si la consommation hivernale anticipée de fourrages transformés est proche ou non de ce qui est récolté. Des modifications de configuration peuvent s'opérer entre deux ateliers, par exemple le transfert d'une parcelle pâturable de l'atelier (ou la saison-pratique) « pâturage des génisses au printemps » à l'atelier (ou la saison-pratique) « pâturage des vaches au printemps » si ce dernier ne dispose plus de suffisamment d'herbe pâturable pour alimenter le lot pâturant jusqu'au terme de la période concernée. Le nombre et la nature des possibilités de modifications de configuration sont fonction des contraintes qui pèsent sur l'utilisation des moyens de production (Andrieu et al., 2007a, 2007b ; Brunschwig et al., 2006) : des contraintes topographiques (pente, altitude, etc.) ou topologiques (distance de la parcelle à l'étable, distance entre parcelles, etc.) sur les parcelles, des contraintes liées à la capacité à se déplacer des animaux, etc. C'est pour ces raisons que l'analyse du système fourrager ne doit se faire qu'à l'échelle du système, et non pas à l'échelle de chaque ensemble élémentaire ou sous-système. L'organisation des composants du système fourrager est au moins aussi importante que leurs propriétés intrinsèques.

2.1.3. Planification et coordination sous incertitude des actes techniques

L'éleveur planifie et coordonne dynamiquement et dans l'espace, les « rencontres » entre des fourrages pâturables ou transformés et des animaux (Voisin, 1957). Ces décisions aboutissent à la détermination dynamique des actes techniques à réaliser afin de satisfaire l'objectif de production assigné à chaque atelier, et à la réalisation de ces actes techniques utilisant des moyens de production (Fig. 3). D'une année sur l'autre, en dépit des variations de facteurs incontrôlables de l'environnement, en particulier la variabilité climatique intra- et interannuelle, la nature et l'enchaînement des actes techniques que l'éleveur réalise sont assez répétitifs et cycliques (Aubry et al., 1998). S'appuyant sur une analyse réflexive de ses échecs et réussites passés, l'éleveur planifie et coordonne la réalisation des actes techniques, en anticipant les futurs possibles, ou en réagissant à un état présent (Cros et al., 2004). Il adapte au besoin la réalisation planifiée des actes techniques (Fig. 3), car ainsi que le souligne Voisin (1957), comme « l'herbe commande », « la souplesse de conduite est indispensable ». L'éleveur a donc un programme ou plan flexible, incluant une certaine adaptabilité à des variations connues à l'avance des facteurs incontrôlables de l'environnement, et des adaptations exceptionnelles pour les situations nouvelles ou non anticipées (Cros et al., 2004 ; Duru et al., 1988; Sebillotte et Soler, 1988). Cette flexibilité diminue la sensibilité du système fourrager à son environnement, assure la robustesse de ses performances et le maintien des

objectifs fixés par l'éleveur sur le court comme sur le long terme (de Leeuw et Volberda, 1996 ; Lev et Campbell, 1987). Elle inclut la variété des options mobilisables par l'éleveur et la rapidité avec laquelle ces options peuvent être mises en œuvre (de Leeuw et Volberda, 1996). La planification des actes techniques au sein d'un atelier consiste alors à décider de l'élasticité de la tension sur la gestion des flux dans l'atelier. La coordination des actes techniques est, elle, un processus dynamique dans lequel la révision du plan et son exécution sont répétées au gré des changements de l'environnement, et de la réalisation ou non des objectifs assignés à un atelier, par exemple des états des parcelles en herbe à atteindre pour garantir des fonctions d'alimentation assignées à ces parcelles (Guérin et Bellon, 1990). En effet, une même fonction peut être atteinte par différentes combinaisons d'actes techniques, de même qu'une même combinaison d'actes techniques peut conduire à différents états du couvert végétal (Fleury et al., 1996). Il existe donc de fortes interactions entre actes techniques. Par exemple, un pâturage peu ras a des conséquences immédiates sur le redémarrage du cycle de croissance de l'herbe, ou différées sur la valeur nutritive de l'herbe pâturée par la suite. Ces conséquences sont locales, i.e. limitées à la parcelle pâturée, ou diffuses, par exemple si ce pâturage peu ras nécessite d'intégrer un plus grand nombre de parcelles dans le circuit de pâturage pour satisfaire les besoins alimentaires du lot d'animaux pâturant. Il est donc indispensable d'étudier ces actes techniques dans un ensemble planifié et coordonné, et non pas indépendamment les uns des autres.

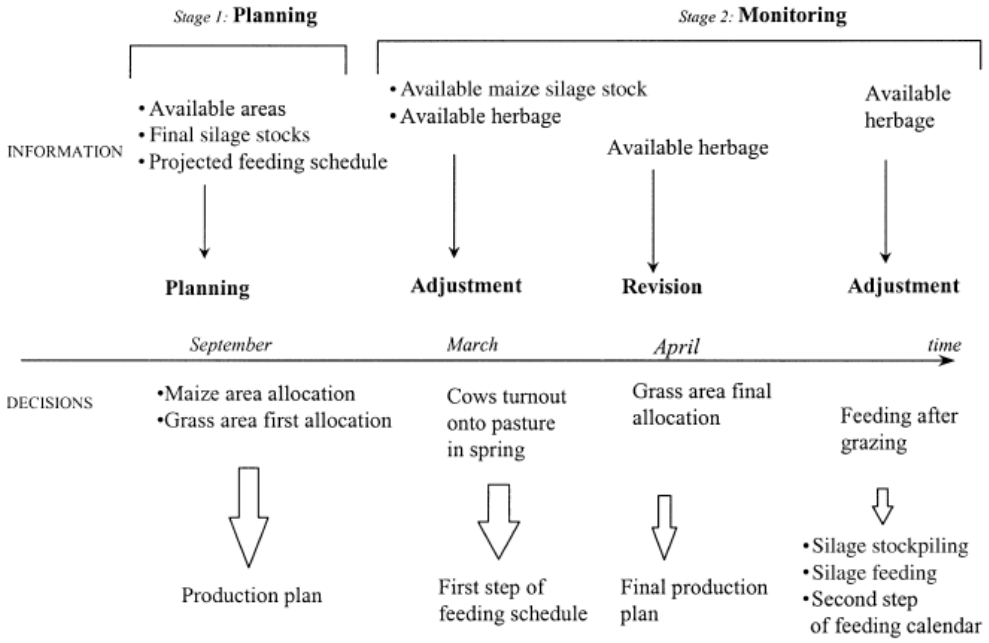


Figure 3 : Diagramme général de planification et coordination d'un système dans lequel l'alimentation des animaux repose sur un mélange de pâturage et d'ensilages de maïs et d'herbe (Coléno et al., 2002).

2.1.4. Conséquences de la variabilité climatique sur le système fourrager

La variabilité climatique intra- et interannuelle est l'un des nombreux facteurs d'incertitude entourant la production agricole (McCown, 2002a ; Meinke et Stone, 2005). Les éleveurs connaissent les risques associés à cette variabilité et la subissent, ou s'en accommodent en révisant leur plan et son exécution afin de garantir la robustesse des performances productives et environnementales de leur système. La principale conséquence de cette variabilité climatique est qu'elle peut engendrer un déséquilibre important entre les flux de production et de consommation de fourrages (Charpenteau et Duru, 1983), immédiatement durant les évènements climatiques « déséquilibrants » ou de manière différée. Lors d'une sécheresse estivale, en provoquant un stress hydrique et thermique, les températures et l'évapotranspiration élevées, et l'absence de précipitations contraignent fortement la production d'herbe. La physiologie et le comportement des animaux et les performances productives qui en découlent sont également affectés puisque leurs besoins énergétiques d'entretien peuvent s'en trouver accrus. Au cours d'une telle période, l'alimentation des animaux au pâturage devient donc de plus en plus difficile car leur consommation tend à se maintenir sans que la biomasse végétale fourragère ne se renouvelle. La sécheresse estivale ne permet pas de récolter des regains. Plus tard dans l'hiver, l'éleveur doit donc faire face à des stocks fourragers insuffisants pour nourrir le troupeau sur la durée de l'hiver. Les conséquences sur les performances du système peuvent donc être lourdes et cumulatives lorsqu'une succession d'évènements défavorables survient, par exemple une sécheresse estivale suivie d'un hiver précoce et long.

La variabilité climatique intra- et interannuelle est l'un des principaux facteurs qui interrogent la durabilité, la robustesse et l'adaptabilité du système fourrager. Pour la durabilité vue sous l'angle de la viabilité, la variabilité climatique crée des déséquilibres entre l'offre en fourrages et les besoins des animaux qui compromettent l'autonomie fourragère et le maintien des performances zootechniques. Ces déséquilibres mettent en péril la régularité et la stabilité des performances productives d'une année sur l'autre, et de ce fait la robustesse du système fourrager. En outre, la variabilité climatique intra- et interannuelle représente une menace pour l'adaptabilité des communautés végétales, en perturbant l'équilibre dynamique interspécifique, compromettant ainsi la pérennisation de ces communautés. Elle agit de même sur le troupeau en affectant ses performances reproductives, et donc son renouvellement. Les conséquences de cette variabilité climatique sur les processus biologiques végétaux et animaux sont encore insuffisamment comprises, en particulier lorsque entre en jeu la diversité biologique végétale et animale, et du territoire d'exploitation.

2.1.5. Enjeux scientifiques sur l'analyse des systèmes fourragers

Le système fourrager entre parfaitement dans la catégorie des systèmes dits complexes, c'est-à-dire des systèmes incluant une multitude de composants en interaction et dont le comportement ne peut pas être simplement déduit de l'addition des propriétés individuelles et du comportement des composants (NECSI, 2009). Pour concevoir des systèmes fourragers innovants, l'analyse et la modélisation de tels systèmes agricoles nécessitent des approches plus intégratives et systémiques que celles mises en œuvre jusqu'alors (Antle et al., 2001). Ces approches doivent permettre de produire des connaissances sur le fonctionnement de ces systèmes à différents niveaux d'organisation, et d'en renouveler les cadres d'analyse, en étendant les champs d'investigation notamment vers l'écologie ou les sciences de la décision. Cette production de connaissances est un prérequis pour donner une assise scientifique à la relance agronomique et à la conception des nouveaux modes de gestion associés (Collège de Direction de l'INRA, 2009). Elle requiert notamment d'améliorer les connaissances disponibles sur (i) le fonctionnement biologique des communautés végétales, des animaux et des troupeaux, en particulier sur les processus ou groupes de processus sensibles pour la réalisation des performances productives ou environnementales escomptées ; (ii) les relations entre ces fonctionnements et les évolutions des facteurs incontrôlables de l'environnement ; (iii) les relations entre ces fonctionnements et les actes techniques agricoles ; (iv) les comportements gestionnaires des agriculteurs c'est-à-dire les processus décisionnels en œuvre pour configurer leur système, et planifier et coordonner de manière flexible leurs actes techniques (Collège de Direction de l'INRA, 2009 ; Doré, 2009). Enfin, l'intégration de connaissances produites par exemple à l'échelle de la plante ou de la parcelle et de la saison, dans un cadre d'analyse ne se résume pas à une addition d'éléments disciplinaires hétérogènes. Lorsque l'on se place à un niveau plus englobant, par exemple, à l'échelle du système de production et d'une séquence pluriannuelle, des méthodes sur les façons d'organiser ces connaissances restent à développer pour créer des liens entre les niveaux d'organisation considérés, et relier des éléments issus de disciplines distinctes dans une représentation non encore réalisée.

2.2. Diversité végétale, animale et du territoire d'exploitation au sein des systèmes herbagers

Comme indiqué précédemment, les principaux types de diversité rencontrées au sein des systèmes fourragers herbagers de montagne concernent la composition biologique des communautés végétales, des troupeaux et des lots d'animaux, et les caractéristiques topographiques et topologiques des parcelles du territoire d'exploitation. Dans ce dernier cas, seule la diversité des caractéristiques topographiques des parcelles a un effet direct sur

les processus biologiques. La diversité de leurs caractéristiques topologiques a un effet indirect en ce sens qu'elle contraint la nature, la date et l'intensité des actes technique réalisables sur une parcelle, mais pas le cours des processus biologiques en œuvre sur cette parcelle. Par exemple, une distance élevée entre une parcelle et l'étable, parce qu'elle ne permet pas d'utiliser tôt au printemps cette parcelle, influence indirectement la production d'herbe au printemps, mais pas directement les mécanismes biologiques sous-jacents à cette production d'herbe tels que la capture du rayonnement incident par le couvert végétal.

2.2.1. Diversité fonctionnelle végétale

Il est d'usage de classifier les espèces végétales selon des critères taxonomiques et de décrire la diversité biologique d'un écosystème sous l'angle de la diversité spécifique en caractérisant le nombre de ces espèces et leurs fréquences ou abondances respectives. Cette classification taxonomique a été très largement utilisée pour en déduire des indices de préférences d'habitats des espèces sur des gradients de nutrition hydrique et minérale, de pH, de perturbation anthropique, etc. (Ellenberg et al., 1992), et des indices de qualité fourragère des espèces et par conséquent des communautés végétales, par exemple la « valeur pastorale » (Daget et Poissonnet, 1971). Ces approches présentent un certain nombre de limites dont les principales résident dans la pertinence des valeurs d'indices en dehors de leur région de définition (Duru et al., 2007 ; Ersten et al., 1998 ; Thompson et al., 1993), et dans la nature invariante de ces indices qui ignorent la temporalité des phases de développement des espèces végétales et ses conséquences déterminantes sur les dynamiques quantitatives et qualitatives du couvert végétal (Ansquer et al., 2008). En effet, la phénologie des espèces végétales, c'est-à-dire la succession de leur phases de développement, rythme la dynamique des modifications qualitatives (germination, floraison, composants pariétaux, digestibilité, etc.) et quantitatives (nombre de feuilles, biomasse, etc.) de la structure des plantes. Ainsi, des espèces de même valeur pastorale peuvent, parce qu'elles n'ont pas la même phénologie, présenter à une même date, des différences importantes en termes de biomasse produite et de valeur nutritive de cette biomasse. Une connaissance fine de cette phénologie est donc essentielle pour un usage efficient et durable de la production d'herbe d'un couvert végétal (Lieth et Radford, 1971).

Un second type de classification dite fonctionnelle, issue de l'écologie fonctionnelle également, dépasse les limites entrevues avec la classification taxonomique. Elle s'appuie sur les traits morphologiques, physiologiques, phénologiques et/ou démographiques des espèces (Díaz et Cabido, 2001). Il faut distinguer les traits de réponse, qui sont établis en fonction de la réponse des espèces aux variations de facteurs du milieu, et les traits d'effet, établis en fonction de leur effet sur le fonctionnement de l'écosystème. Les espèces qui présentent des similarités pour les valeurs de ces traits sont regroupées dans des groupes fonctionnels, et

remplissent une fonction similaire dans un écosystème (Gitay et Noble, 1997). Les espèces d'un même groupe ne présentent pas nécessairement de parentés taxonomiques. La diversité fonctionnelle se réfère donc à une mesure de la dissimilitude entre traits d'espèces au sein d'une communauté, ou au nombre de ces groupes fonctionnels et à leurs fréquences ou abondances respectives (Petchey et Gaston, 2006).

La caractérisation fonctionnelle fournit les éléments clés de détermination des caractéristiques agronomiques d'une communauté végétale (Cruz et al., 2002). Elle permet de définir la phénologie des espèces végétales et donc de la communauté végétale, et d'en déduire la dynamique de l'état quantitatif et qualitatif du couvert correspondant, en particulier la vitesse de croissance, la quantité de biomasse accumulée, et la valeur nutritive de cette biomasse (Cruz et al., 2002). Cet état dépend principalement de quatre caractéristiques phénologiques et morphologiques qui conditionnent la dynamique de la croissance au cours d'une repousse d'herbe et la valeur nutritive de l'herbe issue de cette repousse (Duru et al., 2007). La durée de vie des feuilles d'une espèce, exprimée en somme de températures, détermine, pour une repousse végétative, le moment auquel le pic de production de biomasse est atteint, et ainsi la capacité de l'espèce à être récoltée plus ou moins fréquemment (Lemaire, 1999). Le stade « épi à 10 cm », exprimé en somme de températures, détermine l'entrée en phase reproductrice d'une espèce et l'augmentation de la cinétique de la croissance qui y est associée. De même, dans le cas d'un pâturage précoce, ce stade permet de prévoir la nature de la repousse à venir : végétative si le pâturage est postérieur à ce stade, reproductrice s'il le précède (Gillet, 1980). Le stade floraison, exprimé en somme de températures, détermine à quelques degrés jours près, pour une pousse reproductrice, la date à laquelle le pic de biomasse est atteint, et par conséquent, l'aptitude de l'espèce à être récoltée plus ou moins tardivement (Gillet, 1980). Enfin, la teneur en fibres de l'herbe détermine la digestibilité des feuilles et des tiges et par conséquent sa valeur nutritive (Hacker et Minson, 1981).

La classification des graminées selon un trait de réponse, la teneur en matière sèche des feuilles, qui a été établie en conditions standardisées, est corrélée aux quatre caractéristiques phénologiques et morphologiques d'intérêt (Al Haj Khaled et al., 2006 ; Ansquer et al., 2004 ; Duru et al., 2009b). Ansquer et al. (2004) ont défini quatre groupes ou types fonctionnels de graminées à partir de cette classification (Tab. 1). La composition fonctionnelle d'une communauté végétale se structurant principalement en réponse aux pratiques de fertilisation et de défoliation (Lavorel et Garnier, 2002), les types A et B dominent dans les parcelles fertiles fréquemment défoliées, et les types C et D dans les parcelles au niveau de nutrition plus faible avec un rythme de défoliation plus lent (Ansquer et al., 2004). A l'échelle d'une communauté végétale, l'abondance pondérée des types fonctionnels de graminées est également significativement corrélée à ces quatre caractéristiques, au travers des dates des

pics de production d'herbe végétatifs et reproducteurs (Ansquer et al., 2008 ; Duru et al., 2009b) et de la valeur nutritive de l'herbe (Duru et al., 2008a). Les dicotylédones suivent le comportement des graminées de la même communauté végétale, en ce sens qu'elles présentent des dates des pics de production d'herbe voisines (Ansquer et al., 2009b).

Tableau 1 : Types fonctionnels de graminées selon la teneur en matière sèche des feuilles (Ansquer et al., 2004), et moyennes par groupe pour les quatre caractéristiques agronomiques d'intérêt.

Type fonctionnel de graminées	Type A	Type B	Type C	Type D
Espèces correspondantes	*Holcus lanatus* *Lolium perenne*	*Anthoxanthum odoratum* *Arrhenatherum elatius* *Dactylis glomerata* *Festuca arundinacea* *Poa trivialis*	*Agrostis capillaris* *Avena pubescens* *Festuca rubra* *Phleum pratense* *Trisetum flavescens*	*Brachypodium pinnatum* *Briza media* *Cynosurus cristatus* *Deschampsia cœspitosa* *Festuca ovina*
Durée de vie des feuilles (degrés jours)	502	795	864	1 372
Stade épi 10cm (degrés jours)	568	665	830	1 014
Stade floraison (degrés jours)	1 208	1 317	1 613	1 627
Teneur en fibres (%)	48	49	58	60

Entre groupes fonctionnels (Tab. 1), les différences entre les valeurs moyennes de durée de vie de feuilles, et de stades épi 10 cm et floraison atteignent 870, 446 et 419 degrés jours respectivement. Pour les pousses végétatives comme pour les pousses reproductrices, ces temporalités différentes ont des incidences importantes sur les dynamiques quantitatives et qualitatives des types fonctionnels (Fig. 4). C'est ainsi que la vitesse d'accumulation d'un type A est nettement supérieure à celle d'un type C (Fig. 5). Le type A atteint son maximum près de 300 degrés jours plus tôt, mais le maintient sur une période deux fois plus courte qu'un type C. La digestibilité des feuilles et des tiges qui en découle est toujours, à même stade phénologique, supérieure d'environ 100 g/kg pour une espèce du type A par rapport à une espèce du type C (Duru et al., 2007). Au voisinage de la floraison, ces différences de digestibilité de la plante entière s'estompent, voire s'inversent (Fig. 4). La diversité fonctionnelle inter-parcelles hérite donc de ces différences. La diversité fonctionnelle intra-parcelle, par exemple un mélange de types A, B, et C, réduit les vitesses de changement des dynamiques des états quantitatifs et qualitatifs de l'herbe. C'est ainsi que plus la diversité fonctionnelle augmente, moins la variation relative de la biomasse autour du pic de production est rapide et élevée (Ansquer et al., 2008). De même, la dynamique décroissante de la digestibilité est modérée par une diversité fonctionnelle importante (Ansquer et al., 2008). La diversité fonctionnelle végétale intra- et inter-parcelles conduit donc à des temporalités très différentes, et à des états quantitatifs et qualitatifs qui se maintiennent plus ou moins longtemps. Le renouvellement de ces communautés végétales, c'est-à-dire le

maintien d'un équilibre dynamique interspécifique au sein de ces communautés, implique toutefois d'appliquer des pratiques de fertilisation et de défoliation assez stables.

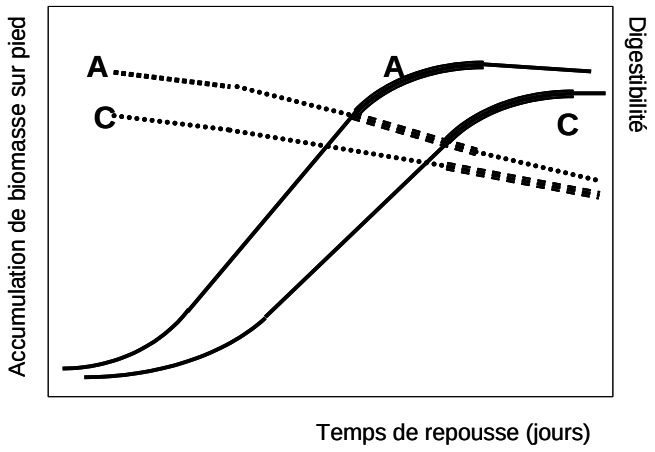


Figure 4 : Accumulation de biomasse (courbes croissantes, ordonnée à gauche) et dynamique de la digestibilité (courbes décroissantes, ordonnée à droite) au cours de la pousse de printemps pour des types fonctionnels de graminées A et C (Duru et al., 2008b).

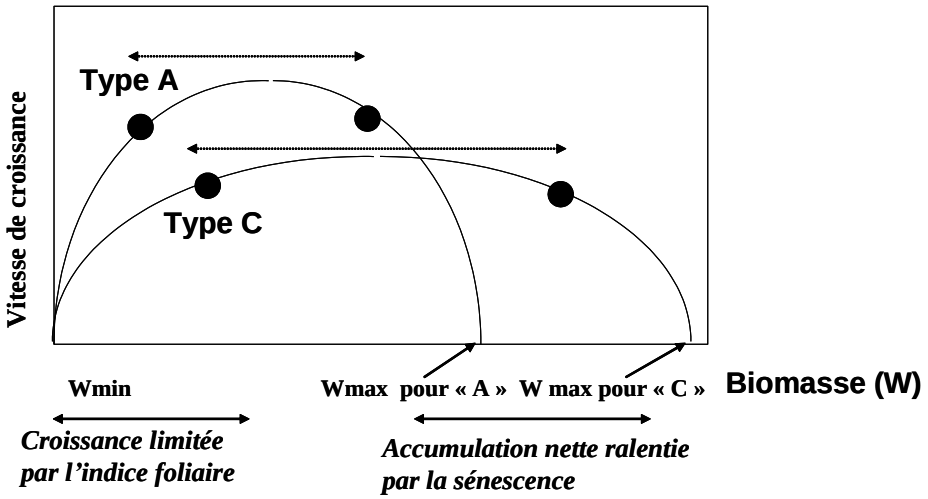


Figure 5 : Vitesse de croissance de repousses végétatives en fonction de la biomasse sur pied pour des types fonctionnels de graminées A et C (Duru et al., 2008b).

2.2.2. Diversité du territoire d'exploitation

Pour décrire la topographie d'un lieu, l'altitude et l'exposition figurent parmi les principales caractéristiques utilisées (e.g. Andrieu et al., 2007a). Au sein des systèmes fourragers herbagers des zones de montagne, il est fréquent d'observer entre parcelles des différences d'altitude, par exemple entre des parcelles de fond de vallée et des parcelles d'estive, et des différences d'exposition, par exemple entre des parcelles de fond de vallée et des parcelles de versant exposées plein sud. Ces différences d'altitude et d'exposition ont des conséquences non négligeables sur la température et le rayonnement incident sur les parcelles (Andrieu et

al., 2007b ; Blumthaler et al., 1997 ; Dvorkin et Steinberger, 1999 ; Legros et al., 1997). L'amplitude des modifications induites par ces différences d'altitude et d'exposition est très variable entre sites. A titre d'exemple, certains travaux rapportent que chaque 100 mètres d'altitude supplémentaires donnent lieu à une diminution de température de 0.6°C (Andrieu et al., 2007b) et une augmentation du rayonnement incident de 1% (Blumthaler et al., 1997). Ce rayonnement incident s'accroît de 18% pour les parcelles exposées sud par rapport aux parcelles plates (Legros et al., 1997).

Même s'il n'y a pas de consensus sur une méthode de calcul ou plus spécifiquement sur les seuils de température minimale et maximale utilisés dans le calcul de la phénologie, il s'agit toujours d'une accumulation de températures quotidiennes moyennes (Ansquer et al., 2009a). Les températures moyennes diminuant avec l'altitude, des différences d'altitude entre parcelles conduisent donc, pour une même communauté végétale, à des stades phénologiques, et donc des temporalités et des états quantitatifs et qualitatifs différents. Le rayonnement intercepté par une plante est l'un des principaux déterminants de sa production de biomasse (Monteith, 1972). Ce rayonnement intercepté dépend du rayonnement incident et de l'efficience d'interception qui elle-même s'accroît avec l'indice foliaire de la plante. Par conséquent, la capture du rayonnement et la production de biomasse induite augmentent avec l'indice foliaire et le rayonnement incident (Gosse et al., 1986). Aussi, des différences d'exposition entre parcelles (e.g. nord vs. sud) conduisent, pour une même communauté végétale, à des rayonnements interceptés par les couverts végétaux différents, et donc des états quantitatifs différents. Autre différence topographique d'importance entre les parcelles, la profondeur du sol qui conditionne la vulnérabilité au stress hydrique du couvert végétal, et donc l'état quantitatif et qualitatif du couvert végétal.

2.2.3. Diversité fonctionnelle animale

Dans notre vision du système fourrager, le troupeau est vu comme un flux de consommation de biomasse végétale à la parcelle ou transformée. Ces quantités ingérées par chaque animal du troupeau varient selon la disponibilité et l'ingestibilité des aliments et les traits fonctionnels des animaux (Fig. 6), i.e. la race, l'âge, le sexe, le type de production (lait ou viande), le stade physiologique (gestation, lactation), le poids et l'état d'engraissement dont les combinaison conduisent à des besoins alimentaires différents entre animaux et au cours du temps (Dulphy et al., 1995 ; INRA, 2007). Les animaux alternent donc des périodes de forts besoins physiologiques, comme la période de saillie pour les vaches durant laquelle l'alimentation ne doit pas être restreinte, et des périodes de besoins plus faibles. Cette alternance leur permet de s'adapter aux variations quantitatives et qualitatives intra- et interannuelles des fourrages pâturables ou transformés (D'Hour et al., 1998 ; Petit et al., 1994 ; Sinclair et Agabriel, 1998), avec plus ou moins d'incidences sur les performances

productives.

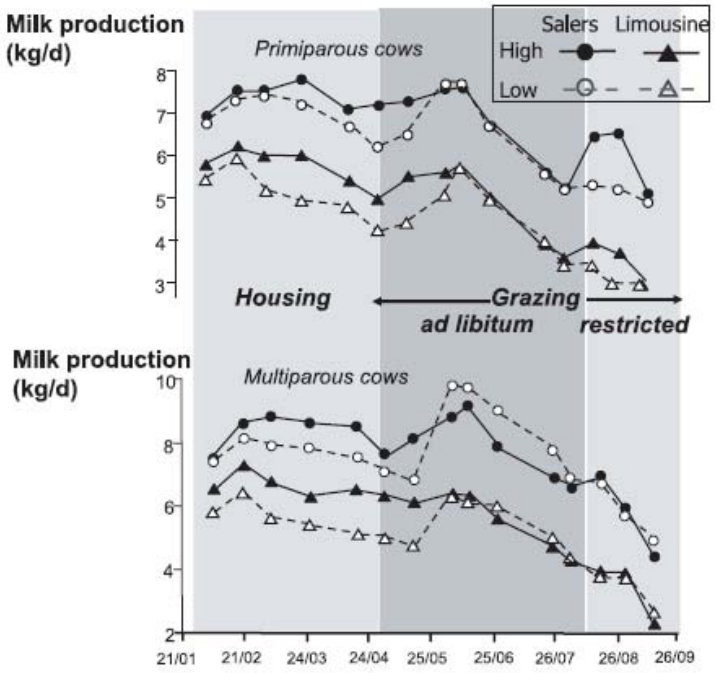


Figure 6 : Changement au cours du temps, et selon leur parité, de la production laitière de vaches Salers et Limousines (n = 127) soumises à deux niveaux de rationnement différents durant l'hiver : élevé (besoins énergétiques couverts) ou faibles (80% des besoins énergétiques couverts (Blanc et al., 2006).

Tous les animaux n'ont pas la même tolérance aux variations quantitatives et qualitatives des fourrages disponibles (Fig. 6). La principale conséquence de ces variations est qu'elles peuvent conduire à une sous-alimentation et une altération des performances productives. Elle diffère principalement selon la rusticité de l'animal (Petit et al., 1994). La rusticité est fonction des mécanismes physiologiques (digestifs, métaboliques et hormonaux) et comportementaux d'adaptation de l'animal à des variations importantes de son environnement, qu'il s'agisse de la disponibilité et la valeur nutritive des fourrages, des conditions climatiques, topologiques (distances) ou topographiques (dénivelés) (Blanc et al., 2006). Cette caractéristique est très fortement liée à la capacité des animaux, en conditions difficiles, à mobiliser leurs réserves corporelles au profit de la production, i.e. croissance, lactation, reproduction, et ensuite à récupérer cet investissement en conditions plus favorables (Petit et al., 1994 ; Sinclair et Agabriel, 1998). C'est ainsi que des vaches primipares Salers et Limousines sous-alimentées durant l'hiver présentent des pertes de poids et d'état semblables, mais que la production laitière et la croissance des veaux se maintiennent mieux chez les vaches Salers (Petit et al., 1994). De même, en sous-alimentation, le nombre de vêlage et le nombre de veaux produits par femelle mise à la reproduction sont plus faibles pour des vaches Limousines que pour des vaches Salers (D'Hour et al., 1998). Des jeunes vaches sont

plus sensibles à ces variations que les vaches adultes (D'Hour et al., 1998 ; Petit et al., 1994). Enfin, parmi les jeunes bovins, ceux qui passent leur premier hiver en stabulation demandent des fourrages conservés de bonne qualité, alors que ceux pour qui il s'agit d'un second hiver en stabulation tolèrent du fourrage de moins bonne qualité (Muller et al., 1992). Y compris au sein d'un lot d'animaux semblables, il existe des différences interindividuelles des quantités de biomasse végétale ingérées qui peuvent atteindre 17% (Dulphy et al., 1995). En termes de flux de biomasse végétale économisée, Petit et al. (1994) rapportent qu'un kilogramme de masse corporelle perdue correspond à une économie de 9 à 14 kilogrammes de foin selon le stade physiologique et l'état de l'animal.

2.2.4. Enjeux scientifiques sur la diversité et opportunités pour des systèmes fourragers flexibles

En pratique, il est impossible, pour l'éleveur, d'utiliser simultanément toutes ses parcelles en herbe pour du pâturage ou de la fauche. En outre, dans de nombreux systèmes, près de la moitié de la production d'herbe annuelle est concentrée sur le printemps. Dans le même temps, les besoins alimentaires des animaux se maintiennent dans une plus grande mesure. Valoriser la diversité fonctionnelle végétale et animale, et du territoire d'exploitation par la configuration du système et la planification et la coordination des « rencontres » fourrages – animaux dans l'espace et dans le temps, requiert donc de mieux comprendre les complémentarités et synergies des rythmes de production des parcelles en herbe et des animaux. « Il existe un moment où une herbe est bonne à faire cisailler par la dent de l'animal, exactement comme il existe un moment où l'herbe est bonne à faire couper par la lame de la faucheuse » (Voisin, 1957). Il s'agit donc de faire correspondre dynamiquement les besoins alimentaires des animaux avec les périodes de disponibilité fourragère, ce qui implique de la flexibilité au sein du système fourrager pour s'adapter à une diversité de contextes de production. Pour ce faire, de nombreux travaux s'accordent à conclure qu'il est nécessaire de porter une considération accrue pour la diversité fonctionnelle végétale et animale, et pour la diversité du territoire d'exploitation (Altieri, 1999 ; Andrieu et al., 2007b, 2008 ; Blanc et al., 2006, 2008 ; Dedieu et al., 2008b ; Tichit et al., 2004; Tittonell et al., 2007 ; White et al., 2004). Cette diversité y est perçue non plus comme une contrainte mais comme une vertu, dotée de propriétés qu'il convient de valoriser. Par exemple, la diversité du territoire d'exploitation peut conférer de la flexibilité au système fourrager, ce qui renforce sa robustesse face à la variabilité climatique intra- et interannuelle (Andrieu et al., 2008). C'est cette diversité fonctionnelle, végétale et animale et du territoire d'exploitation qui détermine le nombre d'alternatives mobilisables pour adapter dynamiquement le système aux conditions actuelles (Rammel et Staudinger, 2002), et ainsi sa flexibilité.

A l'exception d'Andrieu et al. (2007b, 2008) et Dedieu et al. (2008b), les travaux

susmentionnés empruntent des démarches d'expérimentation *in situ*, ou sont des revues bibliographiques de telles démarches qui démontrent l'intérêt de la diversité fonctionnelle, végétale et animale et du territoire d'exploitation. Cependant, aucun de ces travaux, hormis donc Andrieu et al. (2007b, 2008) et Dedieu et al. (2008b), ne fournit de démarche ni de méthode pour caractériser ou concevoir les modalités pratiques de valorisation dynamique et dans l'espace de cette diversité, c'est-à-dire la façon de re-penser configuration du système, et planification et coordination des actes techniques. Plusieurs raisons peuvent expliquer ces lacunes. L'application des concepts de l'écologie fonctionnelle à l'agronomie fourragère est assez récente. Par conséquent, les relations entre pratiques agricoles et composition fonctionnelle des communautés végétales sont encore insuffisamment connues. Les connaissances sur les implications de cette diversité sur le fonctionnement biologique des composants végétaux et animaux doivent être améliorées. De même, la plasticité ou la résilience (Carpenter et al., 2001) de ces communautés végétales à des variations de leurs utilisations (nature, temporalité, fréquence et intensité de l'utilisation) est encore mal connue et pourtant indispensable pour envisager la conception de systèmes fourragers herbagers durables. Enfin, comme mentionné en 2.1.5., les connaissances et les cadres d'analyse des comportements gestionnaires des agriculteurs pour configurer leur système, et planifier et coordonner de manière flexible leurs actes techniques nécessitent des approfondissements.

2.3. Les modèles de système d'élevage

2.3.1. Exemples de modèles de système d'élevage

La notion de système fourrager n'est pas partagée dans la littérature scientifique internationale. De nombreux exemples de modèles de système d'élevage y sont présentés (e.g. Dueri et al., 2007), dont certains traitent de ce que la communauté scientifique française appelle le système fourrager (e.g. Romera et al., 2004 ; Jouven et Baumont, 2008). S'opposent les modèles utilisant la programmation linéaire (e.g. Thornton et Herrero, 2001 ; Veysset et al., 2005) qui déterminent, pour un ensemble de stratégies, celle qui maximise une fonction objectif pour un ensemble de contraintes (Fig. 7), et les approches de simulation qui abordent la dynamique du système en reproduisant les processus biologiques, décisionnels et les actes techniques en œuvre sur ce système (e.g. Cros et al., 2003). La simulation dynamique fournit donc des indications sur l'évolution d'un système au modélisateur – analyste et éventuellement à l'éleveur. Ils ont la responsabilité d'évaluer les avantages et défauts d'une stratégie, pour éventuellement la modifier afin de tendre vers ce qui est considéré la « meilleure » ou la plus acceptable (Fig. 8). La programmation linéaire tend plutôt à signifier ce qu'il faudrait faire pour atteindre un objectif. Pour cette évaluation, il est plus aisé d'évaluer à posteriori le comportement de stratégies, comme le permet la simulation, plutôt

que d'énoncer et formaliser *a priori* les critères d'optimisation, en particulier leur combinaison dans une fonction objectif. Lorsque l'on embrasse une approche de modélisation pour assister la conception de systèmes agricoles « situés », il n'y a pas de solution optimale universelle (Cros et al., 2004). La « meilleure » stratégie dépend du contexte et des contraintes spécifiques d'un système, et de l'avis de l'éleveur qui se reconnaît rarement dans une solution optimale (Attonaty et al., 1999). Or, compte tenu des limites des techniques mathématiques et informatiques, la programmation linéaire limite la complexité des systèmes simulés et surtout des stratégies testées, et ne permet pas d'évaluer des adaptations à une stratégie. Au contraire, la simulation dynamique permet de représenter la complexité des processus biophysiques et décisionnels et le rôle des facteurs incontrôlables de l'environnement (Cros et al., 2004).

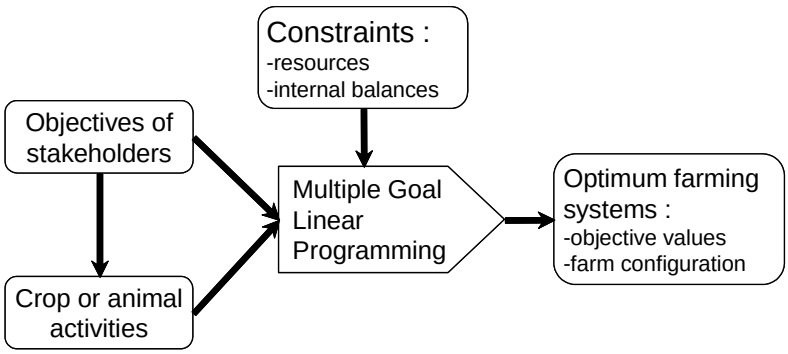


Figure 7 : Représentation schématique d'une approche de conception de systèmes agricoles utilisant la programmation linéaire multi-objectifs (ten Berge et al., 2000). Les systèmes agricoles au sein desquels choisir le « meilleur », pour un ensemble de contraintes, y sont représentés par des combinaisons linéaires « d'activités ». Ces activités représentent des cultures (ou des animaux) avec des techniques de production particulières.

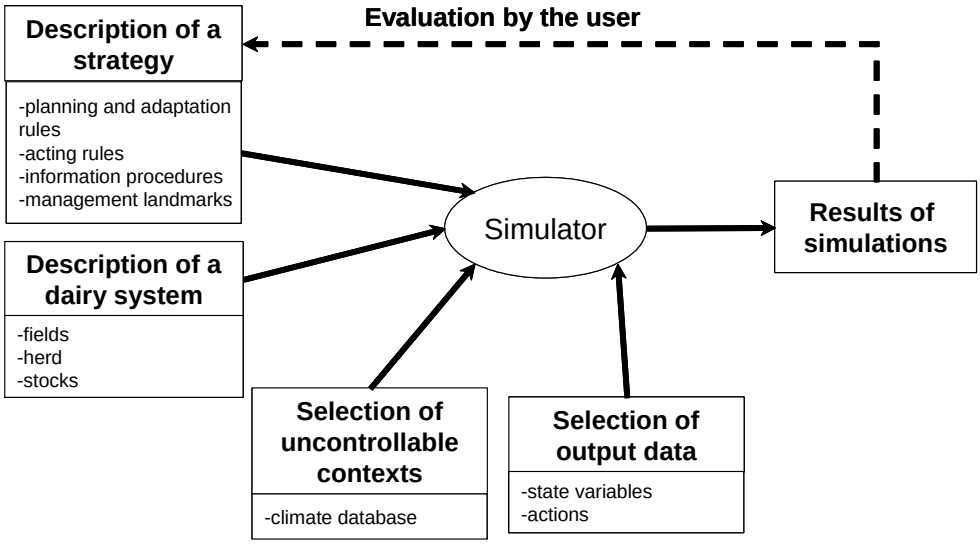


Figure 8 : Représentation schématique d'une approche de conception de systèmes agricoles utilisant la simulation dynamique (Cros et al., 2004). L'utilisateur fixe en entrée une structure d'exploitation et une stratégie d'éleveur, et évalue le comportement de cette combinaison pour différentes séries climatiques, ce qui le conduit éventuellement à réviser la stratégie testée.

Les modèles de simulation dynamique reproduisent dans la plupart des cas, les variations quotidiennes, saisonnières, annuelles voire pluriannuelles de la disponibilité en fourrages sur pied ou conservés, et des effectifs d'animaux et leurs résultats de production (lait et/ou viande), pour différentes conditions de production par exemple climatiques, et différentes structures d'exploitation et/ou stratégies d'éleveurs (Andrieu et al., 2007b ; Cacho et al., 1995 ; Cros et al., 2003 ; Donnelly et al., 1997 ; Jouven et Baumont, 2008 ; Romera et al., 2004). En plus de ces caractéristiques, certains modèles (Chardon et al., 2007 ; Rotz et al., 2009 ; Vayssieres et al., 2009) permettent également de simuler l'impact environnemental des élevages pour ce qui concerne les flux d'éléments minéraux. Ces modèles de simulation incluent des représentations de la plupart des composants que Bryant et Snow (2008) perçoivent comme indispensables : la gestion du système fourrager ou d'élevage, le climat, le troupeau, et le parcellaire dans sa structure spatiale, et ses variations de types de sol, et de couvert végétal. Les principaux processus biologiques représentés sont les cycles de l'eau et des nutriments, la production fourragère, l'ingestion et les performances du troupeau. Les modèles stochastiques rendent compte de la nature aléatoire de certains phénomènes ou de l'incertitude provenant de la complexité des interactions entre processus biologiques et décisionnels et actes techniques (e.g. Pleasants et al., 1997). Pour la plupart des modèles de simulation susmentionnés, la nature aléatoire des conditions d'une simulation provient de la variabilité climatique et de ses conséquences sur le comportement d'un système. De ce fait, la plupart de ces modèles sont déterministes, c'est-à-dire qu'ils utilisent des relations certaines, et que pour un même ensemble de données en entrée du simulateur, le comportement simulé du système sera toujours le même (Coquillard et Hill, 1996).

Les modèles de simulation susmentionnés s'appliquent aux systèmes herbagers pour la production d'ovins viande en Nouvelle-Zélande (Cacho et al., 1995) et en Australie (Donnelly et al., 1997), aux systèmes herbagers ou mixtes (incluant des cultures) pour la production de bovins laitiers aux Etats-Unis (Rotz et al., 2009), en Bretagne (Chardon et al., 2007 ; Cros et al., 2003), dans le Massif Central (Andrieu et al., 2007b) et à la Réunion (Vayssieres et al., 2009), ou aux systèmes herbagers pour la production de bovins allaitants en Nouvelle-Zélande (Romera et al., 2004), aux Etats-Unis (Rotz et al., 2009) et dans le Massif Central (Jouven et Baumont, 2008). Ils s'appuient en général sur une combinaison de sous-modèles mécanistes et empiriques. Les sous-modèles mécanistes présentent l'avantage de décomposer finement les dynamiques du monde réel, en particulier les mécanismes de réponse des composants biologiques à la variabilité climatique ou aux actes techniques. La limite principale de ces sous-modèles mécanistes est qu'ils nécessitent un grand nombre de paramètres relativement difficiles à déterminer. C'est la raison pour laquelle certains processus biologiques sont modélisés à partir de relations empiriques. Ces modèles de simulation sont pour la plupart écrits directement en langage informatique, et de ce fait ne

bénéficient pas des facilités de programmation permises par les environnements de génération de code, mais surtout rendent ces modèles très tributaires de la vision de leur développeur, ce qui compromet la lisibilité et la réutilisabilité du code (van Ittersum et Donatelli, 2003). Deux modèles de simulation étudiés (Chardon et al., 2007 ; Vayssieres et al., 2009) s'appuient sur des cadres de modélisation qui dépassent ces limites en permettant le développement et le partage de modules portant sur des domaines de connaissance particuliers.

En résumé, la plupart des modèles de simulation dynamique existants suivent une approche déterministe, et combinent des sous-modèles mécanistes et empiriques écrits directement en langage informatique dans la plupart des cas. Hormis leur domaine d'application, ils ne présentent donc pas, sur ces aspects, de différences majeures. Les deux sections à venir évaluent la modélisation des éléments clés de ce travail dans ces modèles de simulation, la diversité biologique et fonctionnelle, végétale et animale, et du territoire d'exploitation, et le comportement de gestionnaire.

2.3.2. Modélisation de la diversité fonctionnelle végétale et animale, et du territoire d'exploitation

La diversité fonctionnelle végétale et animale, et du territoire d'exploitation n'est pas représentée avec le même niveau de détail dans les modèles de simulation étudiés. Pour simuler la dynamique de variations quantitatives et qualitatives des fourrages disponibles sur les parcelles, certains modèles ne tiennent pas compte du tout de la diversité fonctionnelle végétale, se limitant à la prise en compte d'un seul type de prairie caractéristique d'une zone d'étude (Cacho et al., 1995 ; Cros et al., 2003 ; Romera et al., 2004). Parmi ces modèles, certains intègrent également de quoi simuler l'installation et le développement de cultures annuelles dans les systèmes mixtes pour la production de bovins laitiers (Chardon et al., 2007 ; Vayssieres et al., 2009). Les modèles de simulation de Moore et al. (1997) et Corson et al. (2007) utilisés respectivement dans Donnelly et al. (1997) et Rotz et al. (2009), permettent de simuler des prairies monospécifiques ou issues de mélanges d'un nombre limité d'espèces, par exemple *Dactylis glomerata* L., *Trifolium repens* L., *Cichorium intybus* L. dans le cas de Corson et al. (2007). Ce nombre limité ne permet pas de représenter le diversité fonctionnelle importante que l'on retrouve dans de nombreux systèmes herbagers, avec des prairies dominées par *Holcus lanatus* L. et d'autres par *Agrostis capillaris* L. au sein d'un même système. Enfin, certains modèles intègrent la diversité fonctionnelle végétale au travers du type fonctionnel de graminées dominant sur chaque parcelle (Andrieu et al., 2007b ; Jouven et al., 2006 utilisé dans Jouven et Baumont, 2008). A l'exception du modèle d'Andrieu et al. (2007b) qui tient compte de la diversité des types de sol, d'exposition et d'altitude entre parcelles, les autres modèles de simulation étudiés n'intègrent que la

diversité des types de sol.

Dans les modèles de simulation étudiés, l'ingestion et les performances des animaux sont modélisées pour un animal représentatif d'un troupeau (Andrieu et al., 2007b ; Cros et al., 2003), d'un lot d'animaux (Freer et al., 1997 utilisé dans Donnelly et al., 1997 ; Jouven et al., 2008 utilisé dans Jouven et Baumont, 2008 ; Rotz et al., 2005 utilisé dans Rotz et al., 2009), d'un groupe d'animaux inclus dans un lot (Chardon et al., 2007 ; Vayssieres et al., 2009), ou d'un individu (Cacho et al., 1995 ; Romera et al., 2004). Dans les modèles de simulation avec un animal représentatif d'un troupeau, cet animal est une combinaison unique de race, d'âge, de sexe, de fonction productive, et de stade physiologique. Les besoins alimentaires et la consommation en fourrages de chaque individu du troupeau sont donc considérés comme identiques. A l'inverse, les modèles de simulation avec un animal représentatif d'un individu permettent de multiples combinaisons et la constitution de lots d'animaux simulés présentant des variations importantes de besoins alimentaires et de consommation en fourrages entre individus.

En résumé, les modèles de simulation tiennent compte au mieux de la diversité fonctionnelle végétale inter-parcelles, et de la diversité fonctionnelle animale inter-individus. Mais aucun de ces modèles de simulation ne tient compte à la fois des diversités fonctionnelle végétale intra- et inter-parcelle, animale intra-lot d'animaux, et du territoire d'exploitation qui sont nécessaires pour évaluer le potentiel de systèmes fourragers flexibles car valorisant cette diversité.

2.3.3. Modélisation du comportement gestionnaire des éleveurs

Dans la plupart des modèles de simulation de systèmes agricoles, la dimension humaine est réduite à son strict minimum, ce qui conduit souvent à une représentation irréaliste voire court-circuitée des comportements d'agriculteurs (Garcia et al., 2005 ; McCown, 2002b). Il s'agit pourtant d'un facteur clé pour évaluer le comportement de différents systèmes simulés. D'après Malcolm (1993 cité par Ronan, 2002):

> « The major reason for the limited relevance of a good deal of academic work in farm management to (actual) farm management is probably to be found in the methodology. The basic production model leaves out most of the really important things for farm management, viz., the technology, the human element, the risk, the dynamics and time. »

En effet, les travaux publiés qui proposent des concepts et des méthodes pour l'analyse et la modélisation des comportements de gestionnaires en agriculture ne sont pas légion. La littérature sur le sujet est beaucoup plus riche dans le domaine de l'industrie (e.g. Edwards et al., 2004). Mais les systèmes agricoles présentent des spécificités : l'absence de hiérarchie de

décideurs, l'incertitude forte liée non pas à la demande en produits mais au climat qui affecte le déterminisme des actions, l'effet des facteurs naturels incontrôlables qui génèrent dynamiquement des contraintes spatiales, temporelles et sur l'utilisation des ressources (main d'œuvre, matériel), et qui affectent la nature et la qualité de la production, la durée de fabrication d'un produit très peu modifiable en agriculture alors qu'il y a, dans l'industrie, la préoccupation continue d'optimiser l'utilisation des équipements pour minimiser cette durée, etc. (Martin-Clouaire et Rellier, 2006). De ce fait, les concepts et les méthodes utilisés pour l'industrie et les services ne sont pas forcément pertinents et adaptés pour la production agricole, mais constituent tout de même une source d'inspiration intéressante pour la modélisation de la planification et la coordination des actes techniques pour la production.

Parmi les modèles de système d'élevage étudiés, seuls Chardon et al. (2007) simulent la phase de configuration du système d'élevage, qui est un problème de conception dans leur cas d'un assolement, et la phase de planification des actes techniques associées. Pour ce faire, ils ont recours à la programmation linéaire. Dans tous les autres modèles de simulation étudiés, la configuration du système et la planification sont fixées en entrée du modèle et seuls les processus décisionnels en jeu dans la réalisation des actes techniques sont simulés. A l'exception du modèle de Chardon et al. (2007), l'ensemble des modèles étudiés utilise des règles de décisions du type « SI… ALORS… » ou « SI… ALORS… SINON… » pour représenter les processus décisionnels de l'éleveur conduisant à la réalisation de séquences d'actes techniques. Ces règles de décision pour la réalisation des actes techniques sont soit rigides et basées sur un calendrier d'évènements connus (Cacho et al., 1995 ; Donnelly et al., 1997), soit plus souples et basées sur une combinaison entre un calendrier d'évènements et des états des composants du système d'élevage, ou des conditions climatiques (Romera et al., 2004 ; Rotz et al., 2009). Dans ce dernier cas, les règles de décisions peuvent être organisées dans une représentation qui guide la réalisation des actions (Andrieu et al., 2007b ; Cros et al., 2003 ; Jouven et Baumont, 2008; Vayssieres et al., 2009). Cette représentation s'appuie sur une théorie du comportement de décideur, le modèle d'action (Sebillotte et Soler, 1988). Le modèle d'action s'organise autour d'un ou plusieurs objectifs généraux, d'un programme prévisionnel marqué par des états cibles à atteindre pour la réalisation des objectifs généraux, et d'un corps de règles de décision qui définit pour chaque étape du programme la nature des décisions à prendre ou des solutions alternatives à envisager. Ces règles de décisions spécifient l'ordre chronologique de réalisation des actes techniques, les conditions temporelles ou d'état du système pour leur réalisation, l'arbitrage entre actes techniques pour l'utilisation de ressources (main d'oeuvre, matériel), la détermination des modalités des actes techniques, ou le regroupement de composants biologiques gérés de manière identique (Aubry et al., 1998). Il s'agit là d'un des développements conceptuel et méthodologique précurseur pour la représentation des comportements de gestionnaire en agriculture qui a

donné lieu à de nombreuses applications en plus des modèles de simulation étudiés, dans les domaines de la gestion des cultures annuelles (Aubry et al., 1998), de l'irrigation des cultures annuelles (Bergez et al., 2001), des effluents d'élevage (Aubry et al., 2006), ou des troupeaux de bovins allaitants (Ingrand et al., 2003).

Plusieurs limites des approches basées sur des règles de décision ont été pointées du doigt. La principale est ontologique : un gestionnaire ne raisonne pas en termes de règles de décision, mais plutôt selon des tâches à effectuer. La représentation par règles de décision impose au modélisateur d'envisager *a priori* toutes les situations susceptibles de survenir (Snow et Lovatt, 2008), alors même que les processus décisionnels des agriculteurs sont souvent implicites et difficiles à caractériser. Le formalisme « SI… ALORS… SINON… » peut s'avérer rapidement limitant et complexe à modifier (INRA, 2005) alors que le nombre de conditions incluses dans les règles de décision et que le nombre de règles de décision s'accroissent. Ceci s'explique par l'absence de méta-structure ou de méta-règles qui spécifient comment ces règles sont agencées dans le temps. Ces limites peuvent donc conduire à des représentations très simplifiées d'une réalité. Prenons l'exemple du modèle de simulation de Jouven et Baumont (2008). Les modifications du programme prévisionnel s'y opèrent à trois dates fixes au cours de l'année selon les résultats d'un calcul de stocks d'herbe d'avance. Si une sécheresse survient entre deux de ces dates, aucune modification du programme n'est mise en œuvre. L'alimentation simulée des animaux conduisant systématiquement à la réalisation des objectifs de production, l'augmentation des quantités d'aliments concentrés distribuées compense l'absence de fourrages pâturables. Les quantités simulées d'aliments concentrés distribuées peuvent donc être très éloignées des observations en fermes. En effet, dans de telles situations, les éleveurs tolèrent une sous-alimentation de leur troupeau et n'augmentent donc pas les quantités d'aliments concentrés distribuées dans de telles proportions. De même, les animaux n'étant pas affectés par une telle sous-alimentation dans les simulations, leur poids simulé revient toujours à l'équilibre, ignorant ainsi les compensations inter-saisonnières et interannuelles qui s'opèrent. Les approches basées sur des règles de décision, déjà complexes pour représenter les situations de gestion routinière, en particulier la prise en compte des contraintes spatiales, temporelles et sur l'utilisation des ressources (INRA, 2005), sont donc très limitantes sitôt que des modifications du programme prévisionnel sont en jeu. Ce n'est pas sans poser problème pour le réalisme des simulations car, comme le souligne Malcolm (2001 cité par Ronan, 2002), « …deciding on and implementing change is what farm management is mostly about… ».

Des développements plus récents issus de Cros et al. (2004), Garcia et al. (2005) et Martin-Clouaire et Rellier (2003, 2009) et utilisés par Chardon et al. (2007) opèrent une modification déterminante dans la représentation des comportements de gestionnaire en agriculture. Dans cette perspective, le gestionnaire a plusieurs fonctions (Garcia et al., 2005 ; Martin-Clouaire et

Rellier, 2006) qui vont au-delà de celles contenues dans le modèle d'action (Sebillotte et Soler, 1988) :

- configurer le système de production ;
- définir des objectifs, un plan flexible d'activités susceptibles de conduire à leur réalisation, et les principes à respecter pour l'exécution des activités compte tenu de contraintes diverses ;
- surveiller l'occurrence d'événements décisifs et l'état du système ;
- manipuler des informations et des connaissances issues de cette surveillance ;
- organiser et mettre à jour dynamiquement les activités (e.g. lorsque certaines activités sont devenues obsolètes), réviser le plan au besoin pour mettre en œuvre des adaptations, et exécuter les actes techniques correspondants aux activités.

Ce cadre de représentation passe donc d'une approche centrée sur les règles de décision à une approche centrée sur la notion d'activité, c'est-à-dire la spécification non complètement déterminée d'une tâche. Le programme permettant d'atteindre des objectifs n'est plus vu sous la forme d'un corps de règles de décision (Sebillotte et Soler, 1988), mais sous la forme d'un ensemble d'activités organisées dans le temps et l'espace, i.e. un plan flexible, incluant les adaptations à mettre en oeuvre pour s'adapter à une diversité de situations, et un rythme d'examen de ce plan par le gestionnaire pour l'infléchir si besoin (Martin-Clouaire et Rellier, 2006). Ce cadre de représentation intègre plus explicitement les interactions dynamiques entre le gestionnaire, le système biotechnique et l'environnement qui aboutissent à des processus décisionnels. Il permet par exemple, de traiter de questions de limitations sur les ressources : comment organiser des activités ou gérer des concurrences entre elles. En dépit de l'intérêt de ces approches issues de l'intelligence artificielle, il s'agit là de développements récents, ce pour quoi elles restent encore peu utilisées.

2.3.4. Enjeux scientifiques sur la modélisation des systèmes d'élevage

La modélisation du système fourrager ou d'élevage est une tâche complexe. Elle nécessite de représenter l'interaction entre la production fourragère, l'alimentation des animaux et la production animale qui en résulte, et ainsi d'intégrer ces modèles de processus biologiques végétaux et animaux en interaction. Comme énoncé en 2.1.5., l'intégration de connaissances hétérogènes dans un modèle cohérent, siège du lien entre des niveaux d'organisation, des éléments disciplinaires, des caractéristiques microscopiques et macroscopiques, etc. est un problème sans solution à ce jour. Elle soulève des questions conceptuelles et techniques entres autres de détermination des points de connexion entre modèles, de non homogénéité des variables, de synchronisation des pas de temps (van Ittersum et Donatelli, 2003). Le

paramétrage et la validation de tels modèles s'en trouvent également complexifiés. Des méthodes spécifiques des modèles complexes pour l'analyse de sensibilité et d'incertitude restent à développer (INRA, 2005). Jusqu'à présent, ces limites ont conduit les modélisateurs à simplifier les représentations pour homogénéiser le niveau d'abstraction de leurs modèles de système d'élevage afin de répondre à une question particulière, par exemple dans le cas d'Andrieu et al. (2007b), la valorisation du territoire d'exploitation pour limiter la sensibilité aux aléas climatiques. C'est l'une des raisons qui peuvent expliquer qu'aucun des modèles étudiés ne tienne compte à la fois de la diversité fonctionnelle végétale et animale, et du territoire d'exploitation. Les mêmes raisons restent valables pour la modélisation des comportements de gestionnaire. Le manque de crédibilité des modèles de simulation de système d'élevage est souvent associée à la représentation irréaliste voire court-circuitée de ces comportements (Garcia et al., 2005 ; McCown, 2002b ; Woodward, 2008). A l'échelle du système d'élevage ou du système fourrager, le nombre de décisions prises et d'actes techniques réalisés est très important. Les limites conceptuelles et méthodologiques des approches existantes ne permettaient pas d'aborder par simulation des questions proches de celles rencontrées par les éleveurs, par exemple sur les coordinations spatio-temporelles complexes des activités qui prennent en compte de nombreux éléments comme des contraintes sur les ressources. Ces limites incombent pour partie à la nature disjointe des projets de modélisation par simulation de systèmes agricoles. Peu de projets partagent des ressources, en particulier l'utilisation de cadres de modélisation qui fournissent des concepts et structures qui auraient pu permettre une analyse plus réflexive sur ces différents projets pour des avancées conceptuelles et méthodologiques supérieures supportées par un accroissement de l'intelligibilité, la communicabilité, la lisibilité, l'interchangeabilité, la généricité, l'interopérabilité, la liberté, l'ouverture, et le caractère partageable des modèles de simulation (Rellier, 2005). Si les développements plus récents qui posent les bases d'un méta-modèle générique de simulation des systèmes de production agricoles (Martin-Clouaire et Rellier, 2003, 2006, 2009) méritent d'être évalués pour d'autres applications que Chardon et al. (2007), elles n'apportent pas de réponse à plusieurs verrous méthodologiques actuels tels que la modélisation des décisions sur un horizon long, ou le raisonnement sur des buts (INRA, 2005). De même, aborder la simulation comme une expérimentation virtuelle requiert le développement de méthodologies dédiées du plan d'expérience et de la validation.

2.4. Formulation du projet de thèse

Dans cette recherche, la flexibilité du système fourrager est vue comme la résultante d'une valorisation de la diversité fonctionnelle végétale et animale, et du territoire d'exploitation de ce système, par un comportement de gestionnaire adapté de l'éleveur, et comme un moyen pour renforcer la durabilité, la robustesse et l'adaptabilité des systèmes fourragers

herbagers des zones de montagne. **La thèse défendue est que l'analyse de systèmes fourragers herbagers et la conception réglée de systèmes fourragers flexibles réalistes requièrent de modéliser à un niveau d'abstraction approprié la diversité fonctionnelle végétale et animale, et du territoire d'exploitation, ainsi que les comportements de gestionnaires.** Par approprié, nous entendons un niveau d'abstraction qui tienne compte des connaissances disponibles, de la question d'intérêt, et du type de support informatique disponible. Se pose alors la question des concepts et méthodes pour analyser et concevoir par modélisation et simulation de tels systèmes fourragers flexibles. **La question porte donc sur les connaissances à intégrer et la manière de les intégrer dans une démarche de modélisation systémique et de simulation dynamique permettant d'étudier des systèmes fourragers herbagers pour aider à leur compréhension et enrichir les réflexions sur la conception réglée de systèmes fourragers flexibles.**

La démarche de recherche mise au point dans le cadre de ce projet de thèse s'appuie sur plusieurs sources de connaissances et de données issues d'expérimentations, d'enquêtes, de l'expertise ou de la littérature scientifique. Aussi, la première phase de ce projet a consisté à conduire un inventaire des concepts et méthodes mobilisables pour la modélisation systémique et la simulation dynamique de systèmes fourragers. A l'issue de cette phase d'inventaire qui a permis d'arrêter un certain nombre de choix conceptuels, méthodologiques et techniques, une phase d'allers-retours fréquents s'est instaurée entre une activité d'analyse de l'objet système fourrager, sa modélisation conceptuelle et l'implémentation informatique de ce modèle pour en faire un simulateur (Fig. 9). La description de cette phase de développement du modèle de simulation est l'objet du Chapitre 3, qui décrit le passage de l'analyse d'un système à un modèle conceptuel, puis d'un modèle conceptuel au modèle de simulation au cœur de la démarche proposée. La description de cette dernière étape inclut une application à l'analyse et à la conception réglée de systèmes fourragers flexibles ainsi que des éléments d'évaluation du simulateur. Au détour des allers-retours entre analyse, modélisation conceptuelle et implémentation informatique, un certain nombre de questions concernant l'analyse ou la modélisation de l'objet système fourrager se sont posées qui ont nécessité des approfondissements. Il s'est agi par exemple de mieux comprendre les relations entre la diversité fonctionnelle d'une communauté végétale et les pratiques qui lui sont imposées, ou de caractériser la flexibilité potentiellement exploitable par les éleveurs sur l'utilisation des surfaces en herbe au printemps. Les résultats des travaux conduits pour ces deux exemples sont présentés dans le Chapitre 4. Enfin, l'utilisation de la démarche proposée pour répondre à des questions finalisées d'analyse et de conception réglée de systèmes fourragers, par exemple comment augmenter l'efficience d'utilisation de l'herbe dans un système fourrager, nécessite d'analyser un système en détail dans un cadre compatible avec le modèle de simulation,

d'instancier le modèle de simulation pour son application à ce système puis de réaliser des simulations pour répondre à la question d'intérêt. Ce travail d'analyse, de modélisation et de simulation est l'objet du Chapitre 5.

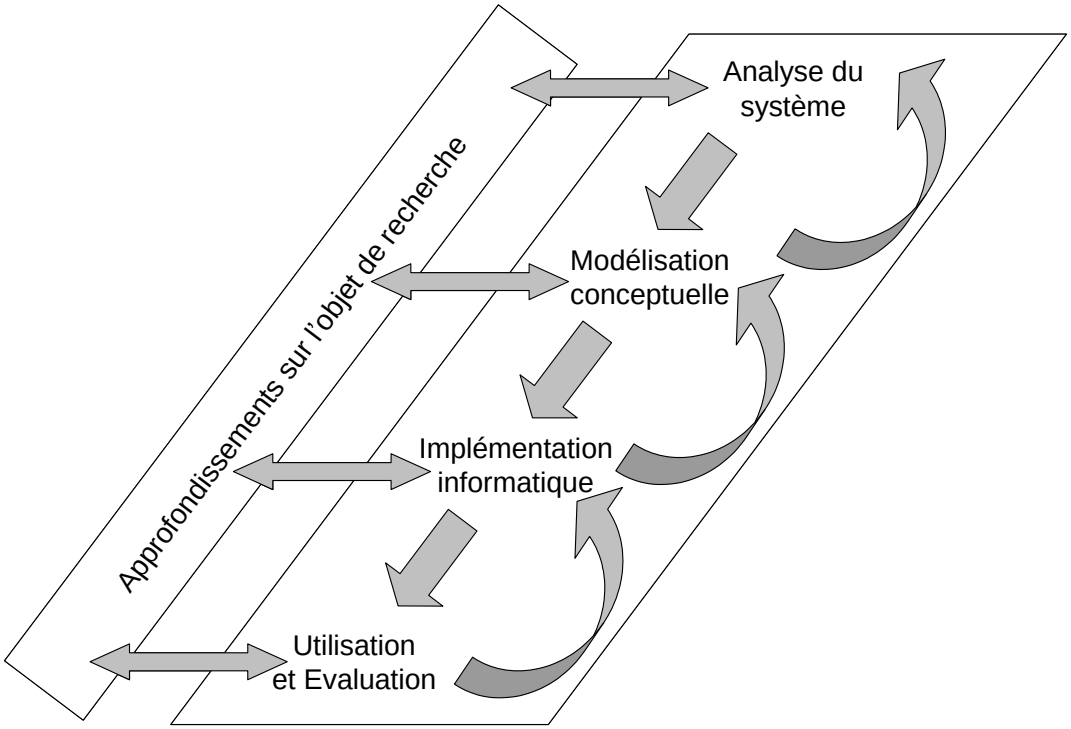


Figure 9 : Représentation schématique de la démarche de recherche et des allers-retours entre les différentes étapes de cette démarche.

3. Développement du modèle de simulation SEDIVER

3.1. Introduction

Ce chapitre décrit le développement du modèle de simulation SEDIVER (Simulation-based Experimentation on livestock systems with plant, grassland, animal and farmland DIVERsity) au cœur de la démarche de modélisation systémique et de simulation dynamique proposée. Le développement d'un tel modèle comprend trois phases : l'analyse du système d'intérêt, sa modélisation conceptuelle et l'implémentation informatique de ce modèle conceptuel. L'analyse du système d'intérêt conduit à spécifier les éléments de ce système, leurs comportements et leurs interactions dynamiques (Coquillard et Hill, 1996). Elle fait typiquement apparaître des insuffisances dans les connaissances ou les données disponibles, l'inadéquation des approches existantes pour répondre à la question d'intérêt, la large gamme des disciplines à considérer, des objectifs à atteindre conflictuels et changeants. La modélisation systémique conceptuelle a alors vocation à rassembler et organiser les connaissances disponibles sur le système d'intérêt jugées pertinentes pour répondre à la question d'intérêt dans un modèle cohérent non informatique d'un domaine d'application particulier. Se pose alors la question suivante :

Quel modèle conceptuel du système fourrager construire, qui, une fois implémenté, facilite l'analyse et la conception réglée de systèmes fourragers flexibles valorisant la diversité fonctionnelle végétale et animale, et du territoire d'exploitation par un comportement de gestionnaire adapté de l'éleveur ?

Et par conséquent :

Quelles connaissances et concepts retenir dans ce modèle ? Comment les organiser ? A quel niveau de détail ? Comment représenter l'organisation dynamique des interactions temporelles et spatiales entre les composantes du système modélisé ? Quelles hypothèses et quelles simplifications ces choix impliquent-ils ?

La Section 3.2. répond à ces questions dans un article soumis à *International Journal of Agricultural and Environmental Information Systems*. Cette présentation du modèle conceptuel constitue en quelque sorte une déclaration d'intention sur la nature du modèle informatique à venir. Elle ne permet toutefois pas de démontrer la capacité de ce modèle informatique à venir à traiter la question d'intérêt, i.e. faciliter la conception de systèmes fourragers flexibles. C'est l'objet de la Section 3.3. qui présente l'implémentation informatique du modèle conceptuel et un exemple d'application du simulateur ainsi obtenu. Se posent dans ce cas les questions suivantes :

Quels concepts du cadre de modélisation utiliser pour implémenter le modèle conceptuel ?

Le modèle conceptuel conduit-il à un modèle de simulation opérationnel ? Les simulations fournissent-elles des comportements du système fourrager simulé réalistes sous différents contextes de production ? Un système fourrager plus flexible, valorisant la diversité fonctionnelle végétale et animale, et du territoire d'exploitation par un comportement de gestionnaire adapté de l'éleveur, voit-il la robustesse de ses performances s'accroître ?

La Section 3.3., qui apporte des réponses à ces questions, repose sur un article soumis à *Environmental Modelling & Software*.

3.2. A conceptual model of grassland-based livestock systems

G. Martin[1,2,*], R. Martin-Clouaire[2], J.P. Rellier[2], M. Duru[1]

[1]: INRA, UMR 1248 AGIR, F-31326 Castanet Tolosan, France

[2]: INRA, UR 875 UBIA, F-31326 Castanet Tolosan, France

[*]: Corresponding author at: INRA, UMR 1248 AGIR, F-31326 Castanet Tolosan, France. Tel.: +33 5 61 28 54 75; fax: +33 5 61 73 55 37. E-mail address: guillaume.martin@toulouse.inra.fr (G. Martin).

Abstract

In grassland-based livestock systems, farmers need to adjust their management practices to accommodate unexpected events such as drought, and preserve the sustainability of their production. A challenging issue is the design of flexible grassland-based livestock systems and management strategies capable of coping with a wide range of conditions. This encompasses increased consideration for the management flexibility provided by plant, grassland, animal and farmland diversity to make more efficient use of natural resources. To evaluate these opportunities, the SEDIVER farm-scale simulation model has been developed. The present article describes the conceptual approach that supports the representation and simulation of grassland-based livestock systems in this model. The novelty of the approach lies in its focus on management strategies that deal with the planning and coordination of activities whereby the farmer controls the biophysical processes occurring in the plant and/or animal entities of the system. The conceptualization draws from various sources including functional plant ecology, livestock science, production management science and artificial intelligence. By using the conceptual framework set up in the SEDIVER project, one can expect to capture part of the subjective and context-specific knowledge used in livestock management and, in this way, make management practices the subject of scientific investigation.

Keywords:

conceptual model / livestock system / grassland / diversity / flexibility / management / simulation

3.2.1. Introduction

In less-favored areas, livestock farming involves the management of a wide range of semi-natural grasslands. Such systems are increasingly threatened by rising input/output price ratios and the growing uncertainty surrounding production due, for example, to year-year weather variability. These problems add to the known difficulties in managing grassland-based livestock systems. In such systems, herbage production is very heterogeneous and

variable in time and space (Parsons, 1988). This is partly because of the variation in vegetation types in relation to management intensity and environmental factors, mainly soil conditions and topography, and partly because of weather variability within and between years. The management challenge is thus to make efficient use of grassland production, and to secure the feeding of the herd in accordance with desired, attainable and currently usable herbage production. Of primary importance for farmers is the development of greater flexibility in farm management, enabling them to take advantage of opportunities, reduce vulnerability to adverse events, or cope with their consequences, in order to preserve the sustainability of their production enterprise.

Farmers have long relied on their intuition and on lessons resulting from analyzing other farmers' experiences to make strategic decisions (Jiggins and Röling, 2000). Nowadays, when management processes must change or be adapted, the ability to use experience and history to discern patterns is still helpful, but given the limitations of human intellect and the increase in the pace and scale of change and uncertainty, it can hardly be used to shape robust decisions that perform consistently across a range of possible situations (McCown, 2002a). The traditional reductionism of agronomic analysis, which examines a production system by taking it apart and understanding its constituent elements, is also inappropriate (Antle et al., 2001). Indeed the parts interact in complex and non-linear ways in response, in particular, to the manager's actions that are inherently discrete. These interactions are highly significant in the overall functioning and performance of the system. They might give rise to phenomena such as a bottleneck on some resources. Understanding the mechanisms and consequences of these emergent phenomena is of key importance in devising a management strategy that complies with the farmer's objectives and constraints.

The idea that farming systems should take greater consideration of plant, grassland, animal, and farmland diversity, both biological and functional, is now generally agreed (e.g. Altieri, 1999; Andrieu et al., 2007b; White et al., 2004). Such an approach encourages more flexible and efficient use of natural resources including herbage production. For instance, it enables functional complementarities and synergisms to be promoted between grassland plots that are suitable for different and sometimes multiple uses that depend on context-specific grassland production, and the feeding requirements of different animal categories (e.g. cows vs. heifers) characterized by different and fluctuating animal intake rates (Duru and Hubert, 2003; White et al., 2004). In addition, all four types of diversity constitute a potential source of flexibility that can be used in management choices to cope with uncertainty about uncontrollable factors such as weather. For instance, on a farm scale, farmland and grassland diversity bring organizational flexibility into farm management, i.e. freedom in the implementation and modification of a management strategy, e.g. a switch in the type of grassland use on a field, depending on the actual conditions encountered. On a field scale,

plant species diversity makes it possible to take advantage of timing flexibility in grassland management (Martin et al., 2009a), i.e. the extent to which the use of a given grassland may be brought forward or deferred at various times of year. More generally, plant and/or animal diversity enhances operational flexibility, i.e. the farmer's ability to modify the target performance or the state of the plant and/or animal material.

The properties and behavior of agricultural production systems which exhibit such an organized complexity may be studied through modeling and computer simulation. Simulation does not replace intuition or lessons learned from other farmers' experiences but rather supplements it by revealing emergent behavior. Research has produced several simulation-oriented farm models for designing livestock systems (e.g. Andrieu et al., 2007b; Jouven and Baumont, 2008; Romera et al., 2004). These models suffer from two main limitations. None of them integrates plant, grassland, animal and farmland diversity, and its consequences on the dynamic heterogeneity of biophysical processes into a single all-embracing model. None considers the flexible and dynamic exploitation of this diversity with sufficient emphasis on the planning and situated, i.e. situation-dependent, coordination over time and space of the farming activities. Integrating these aspects raises an interdisciplinary challenge of knowledge integration (Bammer, 2005) which concerns among others agronomists, animal scientists, production management scientists and artificial intelligence modelers.

This article presents the conceptual model supporting the SEDIVER (Simulation-based Experimentation on livestock systems with plant, grassland, animal and farmland DIVERsity) simulation project that aims to design flexible grassland-based livestock systems and management strategies capable of coping with a wide range of system states and conditions through increased consideration for plant, grassland, animal and farmland diversity. A conceptual model is a non-software description of a computer simulation model. Conceptual modeling is about moving from the recognition of a problem situation, through model requirements to the determination of what is going to be modeled and how. This process makes explicit the link between science and design (Nassauer and Opdam, 2008) thereby constituting the common ground for the interdisciplinary approach. First, it involves identifying relevant concepts and scientific knowledge and determining the appropriate level of detail of the model through the entities, behavior and interactions to be included in it. Then it requires finding areas of overlap to articulate this knowledge in a coherent systemic representation. Finally, it implies clarifying assumptions and simplifications that have to be formulated given the project rationale. In summary, it consists of making choices regarding complexity, uncertainty and imperfection (Bammer, 2005) of the model. The design of the conceptual model is very important because it affects all aspects of a simulation study, in particular the data requirements, the speed with which the model can be

developed, the speed of experimentation and the confidence that can be placed in the model results. Section 3.2.2. introduces the approach to livestock farming taken in this research. In Section 3.2.3. and 3.2.4., we outline the conceptual model of the biophysical and the decision systems and discuss the key modeling choices. In Section 3.2.5. we briefly present how to move from such a conceptual model to simulation-based experimentation.

3.2.2. Livestock farming as the explicit management of biophysical entities and processes

3.2.2.1. A systemic dynamic approach

This research relies heavily on a systemic dynamic view of livestock farming. The livestock production system is a structured organization to transform system resources, i.e. land, animals, equipment, labor and know-how, into animal products, i.e. meat and milk. It responds to internal purposeful drivers, mainly the farmer's interventions and external factors such as weather conditions. The production system is complex and can be broken down into interacting or interdependent subsystems made up of interacting or interdependent entities, in particular the fields, the forage stocks and the animals, which form a complex whole. Controlling these interactions by appropriate and timely interventions to achieve his goals despite environmental and biological variation is the main concern of the farmer. Production management is thus considered as a flexible dynamic process rather than solely a function. Indeed, in making decisions, the farmer is able to take a variety of directions which define different system configurations and dynamic resource allocation, given the potentialities and limitations of his farm.

As has long been done in industrial production management (Schneeweis, 1995), production process design involves planning, coordinating and controlling biophysical and decision-making processes at the production system, i.e. farm, level, whilst most existing investigation approaches tend to address one at the expense of the other. To be relevant to real world decision-making and day-to-day management, one must therefore capture and analyze both the sequence and timing of decisions and feasible actions, and their consequences on the state of the system's entities and their relationships. Emphasizing a farm level approach might reveal the flexibility available to a farmer faced with environmental and biological variation, and might even uncover emergent phenomena or system properties. This is especially needed, given that most experimental field research assumes idealized conditions. The data obtained are informative about the potential production of biological entities, e.g. grasslands, but are of limited practical interest due to the management importance of other factors such as, in particular, weather variability or resource restriction aspects.

3.2.2.2. The biophysical system as a set of managed entities and interacting processes

The biophysical system is composed of a well-structured and ever-changing set of interacting entities. The changes result from biophysical processes and actions taken by the farmer. On the production year scale, the achievement of production objectives calls for skillful management decisions about types of actions, their timing, frequency and extent as a means of influencing the biophysical processes and the interactions between them. As an example, herbage growth on a plot might be affected by the displacement of animals on this plot for grazing to an extent determined by the number of animals, their intake rate and the duration of their stay. For each type of entity, within- and between-entity biological or functional diversities can be distinguished. For instance, grassland diversity exists within a plot through a range of plant species, and between plots through different grassland communities. These within- and between-entity diversities lead to a dynamic heterogeneity of biophysical processes within a farm, in particular for herbage dynamics.

Semi-natural grasslands are complex agrosystems composed of a wide variety of plant species. Their composition depends mainly on management intensity, soil moisture, and nutrient availability (Grime, 1973; Lavorel and Garnier, 2002). Grassland plant species and consequently grasslands exhibit a variety of growth and senescence patterns (Duru et al., 2009a), determined by local (i.e. plot-scale) weather conditions, mineral and water nutrition and timing, frequency and extent of herbage use. These patterns have strong practical consequences on the kinds of versatile and profitable herbage use achievable. The trade-off between growth and senescence, which depends on phenological stages and leaf life span (Duru et al., 2009a), has major consequences on herbage digestibility (Duru et al., 2008c) and the related nutritive value, i.e. fill value, intake rate, and energy content, all closely correlated with digestibility (INRA, 2007). In practice, grassland use by livestock grazing or mowing can hardly be synchronized on all plots at a time to exploit the optimum trade-off, but there is a range around this optimum trade-off that does not result in great losses of one property at the expense of another (Ansquer et al., 2008). At the grassland plot scale, there is a time window for using herbage whose duration depends on herbage availability and nutritive value and herd feeding objectives. Inappropriate grazing such as late use can lead to immediate undesirable effects such as low herbage nutritive value, and indirect delayed effects on availability and nutritive value of herbage for subsequent growth cycles. Inappropriate grazing can even compromise the persistence of the grassland over the long term by affecting the dynamic equilibrium between plant species.

The herd is a set of animals characterized by a breed, a category (e.g. heifer or cow), a physiological status (e.g. gestating or non-gestating cows), a productive function (e.g. fattened heifers for slaughter or replacement heifers) possibly with a production target.

Feeding requirements and intake and performance patterns vary according to such characteristics. Intake and induced animal performance are regulated by the farmer's decisions and actions. For example he might occasionally opt to underfeed in a situation of acute shortage of feeding resources. The animal component of the production system can further be structured into herd batches that group together animals that are managed in the same way. The determination of the size and composition of the herd batches is a key management decision.

The spring herbage production peak constitutes about half of the yearly production. However, livestock feeding requirements do not follow this trend and display a more regular pattern over the year. Thus, despite the wide literature on the topic, we believe that in grassland-based livestock systems, stocking rate is less of a key management issue than the planning and situated coordination over time and space of the encounters between livestock and standing or conserved (e.g. hay) herbage, and the associated distribution of grassland use for grazing or mowing consistent with production potentialities and the likely growth pattern of grasslands, the allocation of animals to appropriate fields according to their feeding requirements, and the frequency and intensity of defoliation likely to result in favorable conditions for the rest of the year. As a consequence, the dynamic heterogeneity of biophysical processes has strong practical implications in the planning and coordination of activities by the farmer. It generates constraints and opportunities for herbage use and animal feeding, which have strong consequences on system performance.

3.2.2.3. The manager as an explicit system that produces decisions and implements actions

The dynamic system view of the livestock system includes the farm manager. Indeed, the farmer who controls the biophysical processes should not be considered as standing apart from the production system but rather as being a main subsystem. As a subsystem he produces decisions and interacts with the biophysical system through control and data collection interventions.

The manager has a management strategy that drives the in-situation management decisions that are both plan-based (anticipatory) and reactive. A strategy reflects the farmer's personal practices, which can be seen in his monitoring and observation behavior, in his understanding of the way the biophysical entities should be operated throughout the season, and in his appreciation of what events are important and how they should be reacted to. As farmers have accumulated experience and advice, they have learned to develop their own temporal organization of farming activities consistent with the overall objective and peculiarities of their production systems. In any particular production system the manager must repeatedly:

- monitor the occurrence of new events and scrutinize salient aspects of the current state of the production system;
- revise the management strategy in situations recognized beforehand to require such adaptations;
- determine the sets of activities that are deemed relevant for execution according to the plan included in the strategy.

As a system, the manager has states and internal dynamics that respond to the passing of time and the influence from other parts of the production system as well as from exogenous factors. The decision-making behavior can be scrutinized, in particular with respect to its ability to cope with uncertainty. This concerns in particular the robustness of the strategy, defined as its capacity to satisfy the multidimensional objectives of the farmer across a range of external factors.

Analyzing the sequence of actions performed on the main biophysical entities e.g. grasslands, may reveal failure or potential improvement in the organization of the production activities over time and space. Such analyses constitute the basis of plan design which focuses on the interdependence between the production activities, whose coordination should achieve the desired outcome, and the feasibility periods and contextual conditions enabling their implementation. The timing of any management operation on biophysical entities, mainly grasslands and animals, depends on their current state. In practice, for any operation there is an ideal time window for its execution. As pointed out by Kemp and Michalk (2007) « farmers can manage more successfully over a range than continually chasing optimum or maximum values. » Thus, in contrast with most of the literature on the topic, we believe the vagueness of a plan is not a fault, but, on the contrary, provides the flexibility needed to cope with the huge number of actual circumstances unfolding during its situated enactment, especially in agriculture where uncontrollable factors play a key driving role. Despite its flexibility, a plan may encounter situations where the initial intention is beyond its bounds as particular events occur (e.g. drought); the production system may then require some adjustments affecting for instance the configuration of some herds or the feeding policy, or call for changes of part of the initial plan of activities (e.g. switching the use of a field from hay-making to grazing when there is a shortage of grazing). Such adaptation capabilities need to be incorporated in the strategy. The necessity to expand or modify the strategy in this respect can be revealed by evaluating the application of the strategy in individual scenarios.

3.2.2.4. Towards the conceptual model

The conceptual modeling effort aims at structuring and organizing the pieces of knowledge

about the system under study in a coherent systemic representation enabling the issue at stake to be tackled. The key decision regards the granularity required in the model to ensure predictive efficiency rather than fundamental mechanistic certainty (Antle et al., 2001). We do not need to model everything, but to include in the model only those events, processes and processed entities essential to efficiently predict the behavior of the studied system at the time and spatial scales of analysis required by the problem. In this case, because our focus is on the role of temporal aspects and timeliness of the decisions, it consists of evaluating at the farm scale the behavior over years of a farming system configuration and the associated management strategy by simulating the operational level. Day-to-day management is the appropriate level to represent realistically a flexible activity plan faced with environmental variability and its consequences on biophysical processes and on the performance of the farm.

In the present project, the design of the conceptual model is greatly supported by the use of the modeling framework DIESE (DIscrete Event Simulation Environment) that itself relies on a generic conceptual model of agricultural production systems (Martin-Clouaire and Rellier, 2009). This modeling framework provides a specific set of constructs that help to represent and articulate the structural, behavioral and dynamic features of the target system. It involves regarding an agricultural production system as an entity situated in and influenced by what is called the external environment. It can be divided into three interactive subsystems: the manager (decision system), the operating system and the biophysical system (Fig. 10). The operating system is simply the system that transforms the manager's decisions

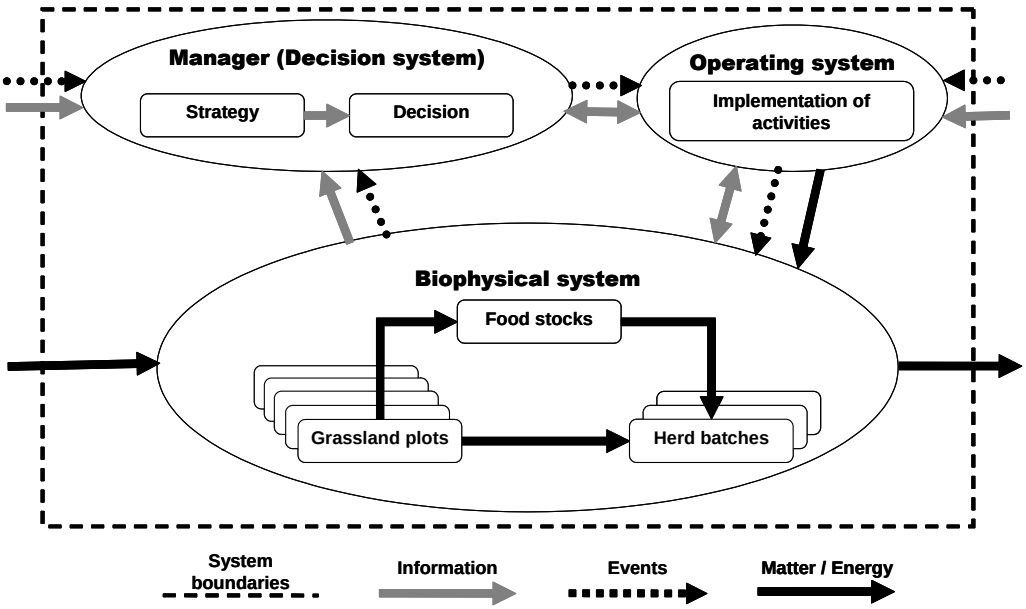


Figure 10 : Livestock production system view in the SEDIVER model.

into actions and executes them using the available resources. Three fundamental concepts are used for the modeling of this dynamic system: entity, process and event. These represent the structural, functional and dynamic aspects of a system respectively (Rellier, 2005). An entity describes a kind of material or abstract item in the area of interest. The state of a system at a given moment in time is the value of the slots of the entities it comprises. A process is a specification of the behavior of a system, i.e. of the entities composing it. A process causes a change in state when a particular event occurs. Thus, events determine the timing of process triggers.

3.2.3. A conceptual model of the biophysical system

3.2.3.1. Overview

The model of the biophysical system (Fig. 11) is composed of four main types of entity: farmland, herd, food storage units and stable. Stable is just considered a physical location which does not include any process. For reasons of clarity, it is not represented in Figure 11 nor mentioned later in the text. The farmland is a set of groups of grassland plots determined according to the proximity between plots. A plot is made up of two interacting components, soil and herbage, the latter being a set of herbage compartments representing groups of plants within the herbage. Food storage units are a set of food storage units in which food stocks coming from harvested herbage such as hay are stored. The herd is a set of animals structured into herd batches and animal groups. Herd batch is a functional managed entity that can contain different types of animals such as replacement heifers and cows constituting animal groups. The herd is fed based on herbage available on the plots or food stocks contained in food storage units. The state of the system entities and the running of the biophysical processes are modified by weather, e.g. temperature and rainfall, and the farmer through his actions. These processes, which determine soil and herbage state i.e. availability and nutritive value, animal feeding and animal state or performance, are modeled at the lowest entity levels, i.e. soil-, herbage- or animal-scale, with a daily time step (Fig. 11). Such a level of granularity is required to account for within- and between-entity biological or functional diversity and its consequences on dynamic heterogeneity of biophysical processes such as the variation in time and space of standing herbage. These processes interact: for example, the updating of herbage state on a plot interacts with the animal feeding process particular to each type of animal composing the herd batch grazing on that plot.

3.2.3.2. Farmland

On the farmland, accounting for groups of grassland plots or land islets is necessary, given that the spatial structure of the farm greatly influences system organization, for example due

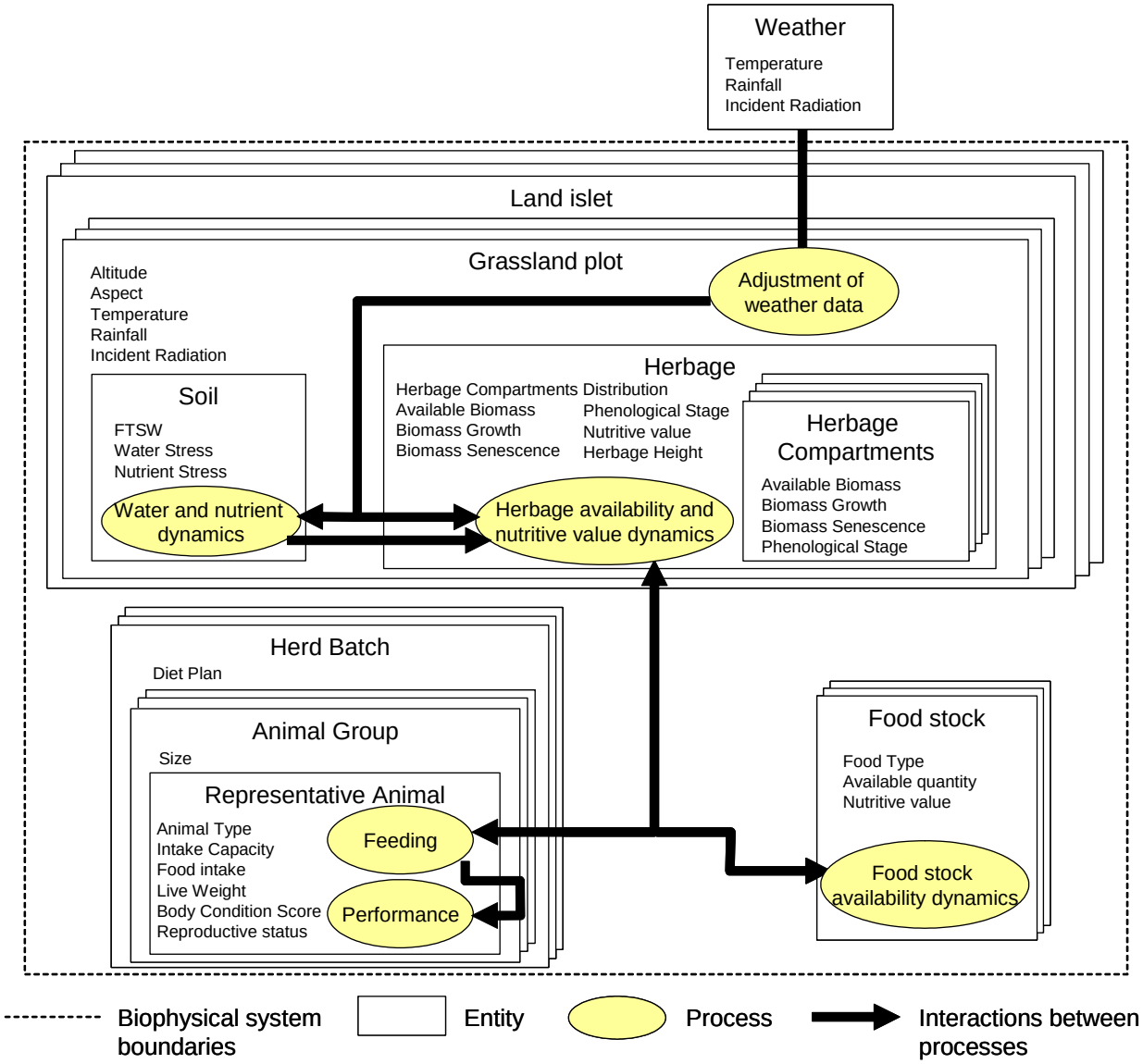


Figure 11 : Main entities and processes in the biophysical system, and interactions between them.

to the ease of herd batch displacements. The key processes to be modeled on the plot for the purpose of the project are those underlying the dynamics of herbage availability and nutritive value (Fig. 11). They depend on so-called defining factors, i.e. weather conditions and plant species characteristics, that determine the potential herbage production and nutrient and water availability as limiting factors that determine attainable herbage production (van Ittersum and Rabbinge, 1997). These factors are described here for the case of semi-mountainous grassland-based livestock systems such as in Martin et al. (2009a).

Plant species characteristics are defined as a model input including the range of plant species characteristics found in such grasslands. To account for this diversity, the concept of functional diversity defined in plant ecology is quite helpful. In this approach, species are classified into groups, here named herbage compartments, that relate directly to function

(primary production) based on shared biological characteristics (plant traits) for plant morphology, physiology and phenology. Functional diversity is based on the identification and measuring of these plant traits in relation to environmental conditions and perturbations (Diaz and Cabido, 2001). A reason for emphasizing a functional ecology approach is that traits are universal whereas species and taxonomic groups are restricted in distribution. Plant traits such as the leaf dry matter content (LDMC) weighted at plant community level are well correlated with agronomic characteristics like herbage digestibility (Al Haj Khaled et al., 2006) and plant phenology (Ansquer et al., 2009a), characterized by the beginning of reproductive phase, flowering and leaf life span, all expressed in thermal time units. Plant phenology governs the dynamics of grass growth and nutritive value. LDMC provides a powerful generic (i.e. with a large validity domain) descriptor of a grassland community for characterizing the within- and between-effect of plant functional composition, or relative abundance of each herbage compartment, for the dynamics of biomass availability and nutritive value, the timing of grassland use on a phenological basis, and timing flexibility through time windows for suitable use (Ansquer et al., 2008). Previous studies such as that of Meot et al. (2003) already identified field functions but missed such key vegetation characteristics to qualify what distinguishes fields for dynamically allocating grassland use.

Accessing grassland community characteristics through weighted mean plant traits provides the information to represent variability of herbage state and dynamics between plots (Fig. 12), or to characterize the thermal time windows for grassland use. Between-field functional diversity spreads the peaks of herbage dry matter over time. Indeed, differences in phenological stages can reach 400 degree days between two vegetation types (Fig. 12, 1st and 2nd columns) which can correspond at a given moment to differences of 50% in above-ground herbage mass (calculation based on Duru et al., 2009a) and by 15% in digestibility (calculation based on Ansquer et al., 2008). Within-field functional diversity softens the changes in herbage growth and digestibility decrease rates (Fig. 12, 1st and 3rd columns) (Ansquer et al., 2008). Herbage digestibility is needed to properly evaluate herbage nutritive value and animal intake as it determines the fill value of the forage and thus the forage quantity that the animal can eat. This information constitutes the basis for allocating grassland use over time and space.

Weather takes the form of upcoming energy and material, i.e. rainfall, radiation and temperature. Given that each plot displays particular topographic peculiarities, upcoming weather data from the reference weather station have to be adjusted in an additional process (Fig. 11) according to plot altitude and aspect. These factors can modify temperature by 0.6°C per 100 m of altitude and daily incident radiation by 1% per 100 m of altitude and by -17% when the plot is north-oriented, and by +18% when the plot is south-oriented (Andrieu

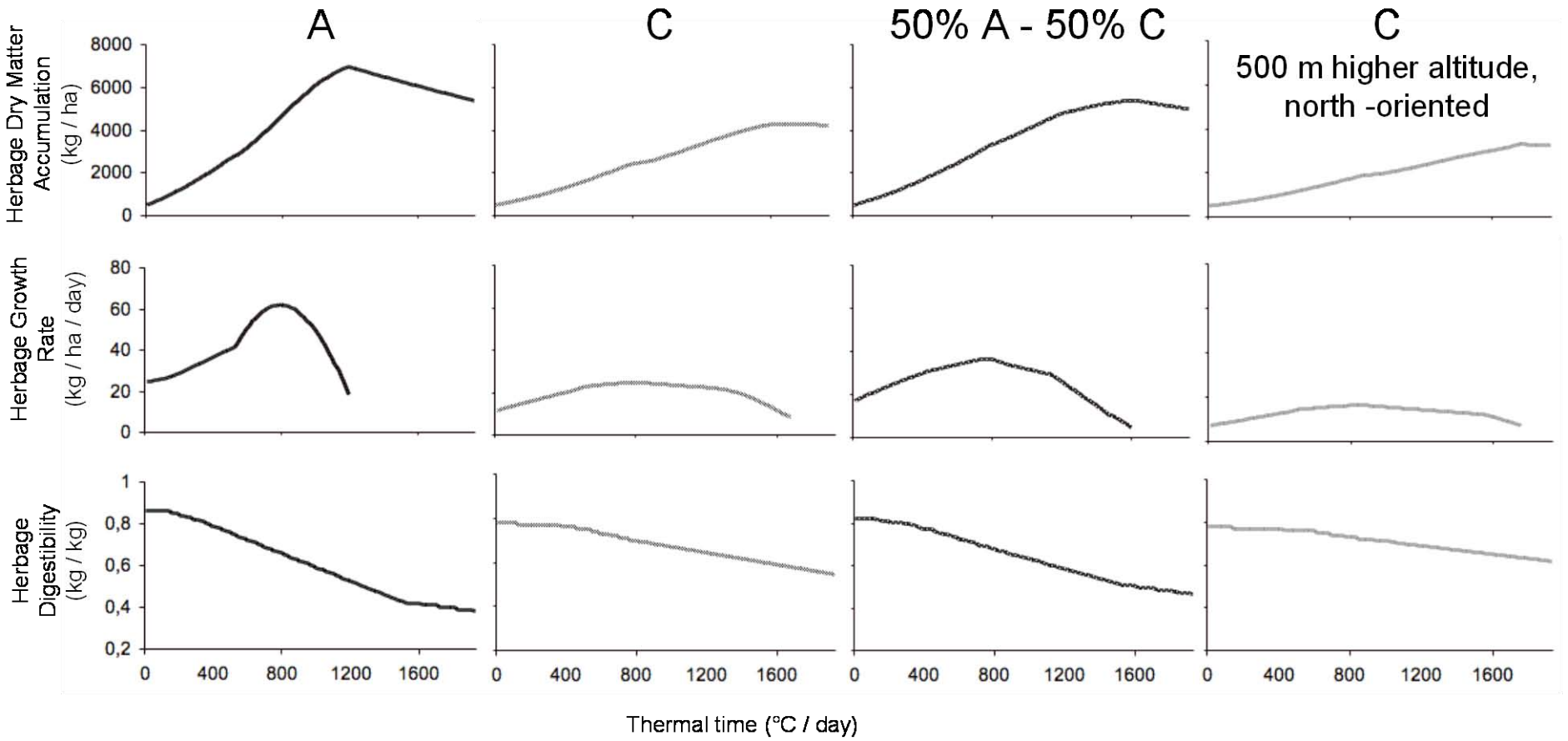


Figure 12 : Examples of processes occurring on four grassland communities with different vegetation types (A vs. C vs. A and C mixed; see Ansquer et al., 2008 for further details) or topographic conditions (last column with vegetation type C growing in a north-oriented plot of higher altitude). From the top to the bottom are the dynamics of herbage dry matter accumulation, daily growth rate (calculations based on Duru et al., 2009a) and digestibility (calculations based on Duru et al., 2008c).

et al., 2007b). Ignoring these corrections to the reference weather data can lead to over- or underestimating daily herbage growth by 50% (Fig. 12, 2nd and 4th column; calculation based on Duru et al., 2009a). On the other hand we assume that for a given farm, daily rainfall can be regarded as uniform.

Plant water and nutrient stress are driven from the soil component. In the soil, water and nutrient dynamics are governed by inflow from fertilization, excreta or rainfall and outflow - mainly uptake by the plant and drainage. A water stress index (Merot et al., 2008) and a plant nutrient index (Lemaire and Gastal, 1997) representing the extent of water and nutrient limitation experienced by the plant in achieving the potential growth permitted by local weather conditions can be calculated with simple characterization of soil properties such as the fraction of transpirable soil water (FTSW). Based on such indices, 0.2 water and nutrient stresses (both on a scale from 0 to 1) induce 25% and 27% shortfalls in the potential growth (calculations based on Duru et al., 2009a) and 5% to the potential digestibility (calculation based on Duru et al., 2008c). Available mechanistic models for nutrient dynamics in grasslands have been calibrated for particular areas (e.g. Scholefield et al., 1991) and would require considerable effort for a recalibration.

The models of Duru et al. (2008c, 2009a) include all the above-mentioned factors and have been slightly modified, in particular to account for within-plot diversity of plant functional types, or relative abundance of each herbage compartment, and for the modeling of the biomass in the ungrazable strata, e.g. below 5-6 cm for cows. Indeed, indicators used in day-to-day management such as herbage height have to be modeled accurately. Residual centimeters after grazing should not be neglected given the remaining grazing days they could provide (between 100 and 500 kg of dry matter per cm according to the type of grassland community) and given that they are essential to ensure the quality of later herbage regrowth (Parsons, 1988). When residual height after grazing is too low, growth is reduced due to a leaf area index that is too low for capturing most of the incident radiation, but beyond this threshold, reducing the intensity of use, either by lengthening the interval between defoliation or grazing, or by increasing the residual height after grazing, results in greater losses from senescence and hence reduced stocking density (Duru and Hubert, 2003).

Interactions between the dynamics of herbage availability and its use take into account day-to-day interactions between processes. Dynamics of herbage availability are modeled on a daily time step as available herbage growth models are not accurate enough to consider shorter time scales. The effects of grazing animals on standing herbage are also modeled on a daily time step. We assume that vegetation characteristics of herbage are uniform on the plot scale.

3.2.3.3. Food storage units

Food storage units contain food stocks i.e. hay, bale-silage, silage and sometimes concentrates. In grassland-based livestock systems, food stocks play a key role in the feeding of the herd. According to the area (e.g. semi-mountainous vs. temperate) they fulfill different functions such as winter feeding for several months or a buffer to compensate for feed shortages at grazing due, for instance, to drought. The importance of food stocks is also related to the farmer's desire for forage self-sufficiency. As a consequence, choices related to food stock management greatly influence the organizational and day-to-day management of grazing, given that the timing, frequency and intensity of grazing depend on the concomitant hay and/or silage-making and distribution. To tackle this issue it is necessary to model food stock dynamics (Fig. 11) taking into account the storage capacity of the food storage equipments, which can be a limiting factor. Nutritive value of the food stocks also has to be considered (Jouven and Baumont, 2008) given that different types of food stocks are suited to different animal categories. As with grazing, it is possible to match the availability and quality of the food stocks distributed to the feeding requirements of animal categories.

3.2.3.4. Herd

Accurately evaluating animal intake and performance, i.e. growth, weight variation, milk production, etc. requires accessing the diversity of animal types encountered on the farm, since different animal categories have different intake rates (INRA, 2007). Animal groups composing herd batches bring together animals of similar breed, category, physiological status, productive function or production level target. Intake can be modified by 8-10% between breeds, up to 400% between young grazing calves and cows, up to 30% between lactating and non-lactating cows, 9% per point of body condition score, about 30% between replacement heifers and heifers for slaughter (calculations based on INRA, 2007). Two processes, animal feeding and performance, are then modeled for a representative animal of each group (Fig. 11).

A diet plan is assigned to each herd batch, defining the content of the diet over the seasons. At the animal scale, we do not mechanistically model the act of prehension (grazing), bolus mastication during rumination or the rumen motility cycle. We only model the daily intake process. Indeed, since we consider a representative animal for a group, we cannot simulate individuals' feed preferences through animal behavior at grazing and the related spatial variation consisting of patches of ungrazed vegetation and nutrient excretion. The corresponding quantities of material are then deducted from standing herbage mass of grassland plots or food stocks. Given the size of the animal group, animal intake at animal group level is evaluated and finally aggregated at herd batch level. In previous models

(Andrieu et al., 2007b; Jouven and Baumont, 2008), animal group and herd batch were not distinguished, making it impossible to model different animal categories mixed within a single herd batch. It is especially useful to the issue tackled, given that herd batch re-composition can be used as a regulatory process to adjust stocking rate for coping with variability in herbage availability. As varying herd size is another way of adjusting herd intake rate, accounting for population dynamics over years is essential to take into account the flexibility it constitutes, as regulated by reproductive events such as mating and calving date, and marketing aspects such as target state at sale.

Intake rate is dependent on the animal side on the energy invested in milk production, on live weight and body condition score, and on the fill value of the diet which is related to food digestibility (INRA, 2007). The partitioning of energy intake between displacement, maintenance, pregnancy and lactation and its consequences on live weight and body condition score is modeled as in Romera et al. (2004) and Jouven and Baumont (2008). As a consequence, the reproductive status of the animals and its impact on animal physiology are also modeled.

3.2.4. A conceptual model of the management system

3.2.4.1. Rationale

The need for process flexibility in the workflow and process technology communities as a critical quality of effective business processes to adapt to changing market demands and other business circumstances has long been recognized (Reijers, 2006). Several authors (e.g. Sawhney, 2006) suggested that manufacturing flexibility should be included as a key dimension of a firm's manufacturing strategy; researchers have posited that firms increase their manufacturing flexibility to allow them to respond to uncertainty in the environment, and that an appropriate match between business strategy and flexibility improves performance. Agricultural production systems are similarly concerned, although uncertainty does not affect production in manufacturing as much as in agriculture, where some key production drivers such as the weather are out of control.

There is an urgent need for more effective whole-farm analyses to address issues of productivity, profitability and sustainability, and the role played by flexibility. A key requirement for such an analytical framework is the capacity to accommodate weather variability and various kinds of uncertainty. Mathematical models of farm management based on static equilibrium conditions fail on several criteria. Dillon (1979) reflected on the scientific discipline of Farm Management research in Australia and concluded that it had lost touch with practical farming because of « logically attractive but largely inapplicable theory. » He emphasized the management challenges created by uncertainty and dynamics, and the

failure of existing mathematical models of farm management to capture these features adequately. McCown et al. (2006) attempted to attract wider recognition of Dillon's criticisms of the mathematical model approach embodied in farm management. Following Dillon, they listed a number of reasons why static equilibrium models cannot be applied to the practice of farm management:

- farm systems are complex and dynamic;
- farming is conducted under conditions of uncertainty and performance depends very much on how uncertainty is dealt with;
- individual farms are unique and farmers have different practices and preferences. A wide variety of so-called farming styles (van der Ploeg, 1994) exist.

Simulation-based approaches that explicitly incorporate production management processes seem to provide a more promising framework to take into account these aspects or highlight the issues they raise. The management system model should explicitly represent the decision-making process and the implementation of the technical actions resulting from this process.

As for the biophysical system, the conceptual model of the management system relies on the DIESE framework that includes specific constructs to represent various aspects relevant to the management functions (Martin-Clouaire and Rellier, 2009). Fundamental to our conceptual model is the commitment to understand things from a farmer's point of view. To be effective, management behavior must be specified by using constructs and language that are intelligible and conceptually close to those actually used in an agricultural setting. The typical approach to representing decision-making in simulation models is to express decision behavior through a set of decision rules. This approach is ontologically limited and becomes cumbersome as the number of rules grows beyond a certain limit; the meta-knowledge about the proper use of the rules, for example which should be applied first when several are applicable, is hard to represent and makes the rule-based approach hard to maintain and reuse.

Hence the basic unit of analysis in our approach is work activity, which is a common high level concept in production management. An activity is a purposeful engagement driven by certain needs to achieve a certain purpose. Activities are contextual in the sense that actual circumstance condition their relevance and greatly affect the way the intended objective is achieved. Activities usually involve the use of resources (equipment, labor). Whenever a combination of activities must be undertaken with a view to achieving a pre-conceived result, a plan is needed to express how those composite activities should be coordinated. A work plan is the result of reflection on prior experiences and in anticipation of particular goals and likely occurrences of important events. Because of this, plans are not rigid in the

sense of a definite and precise specification of the execution steps. Plans are flexible and adaptable to circumstances. A slightly more formal and encompassing conceptual description is given in the next subsection.

3.2.4.2. A conceptualization of production management

In its simplest form, an activity, which we will call a primitive activity, denotes something to be done to a particular biophysical object or location, e.g. a herd batch, building, by an executor, e.g. a worker, a robot or a set of these. Besides these three components, a primitive activity is characterized by local opening and closing conditions, defined by time windows and/or predicates (Boolean functions) referring to the biophysical states or indicators. An indicator is a contextual piece of knowledge or information invoked, assembled, or structured to substantiate a decision-making step, e.g. appraisal of remaining forage amount on a field to decide withdrawal of the herd from it. The opening and closing conditions are used to determine at any time which activities are agronomically eligible for execution; they play a key role in defining the timing flexibility.

The « something-to-be-done » component of a primitive activity is an intentional transformation called an operation, e.g. the harvest operation. The step-by-step changes to the biophysical system as the operation is carried out constitute a functional attribute of the operation. These changes take place over a period of time by means of a process that increases the degree of achievement at each step of the operation until it is completed. An operation is said to be instantaneous if its degree of achievement goes from 0 to 1 in a single step, otherwise the operation is durative which implies that its execution might be interrupted. An operation may require resources such as a mower in case of cutting. In addition, the execution of an operation is constrained by feasibility conditions that relate to the biophysical state. Objects on which an operation is carried out can be individual objects, e.g. a field or a set of fields, or objects having numerical descriptors, e.g. an area. Speed is defined as a quantity e.g. number of items or area, which can be processed in a unit of time. The duration of the operation is the ratio of the total quantity to the speed. In order to have the effect realized the operation must satisfy certain enabling conditions that refer to the current state of the biophysical system, e.g. the field to be processed should not be too muddy, muddy being an indicator. The ability to reap the benefits of organizational and timing flexibility depends on execution competence determined by the involved resources (both operation resources and the executor). Careful representation of the resources and their availability might therefore be essential to get a proper understanding of the situation under study.

Activities can be further constrained by using programming constructs enabling specification of temporal ordering, iteration, aggregation and optional execution. To this end,

we use a set of non-primitive or aggregated activities having evocative names such as before, iterate, and optional. Others are used to specify choice of one activity among several (or), grouping of activities in an unordered collection (and) and concurrence of some of them (e.g. co-start, equal, include, overlap). Formally a non-primitive activity is a particularized activity. As such it might also be given opening and closing conditions as well as other properties such as a delay between two activities involved in a before aggregated activity. In particular, it has a relational property that points to the set of the other activities directly involved in it (or constrained by it). In addition, it is equipped with a set of procedural attributes that convey the semantics of the change in status specific to each non-primitive activity. The opening and closing of a non-primitive activity depend on their own local opening and closing conditions (if any) and on those of the underlying activities. All the activities are connected; the only one that does not have a higher level activity is the plan. In addition to the timing flexibility attached to the opening and closing conditions of its activities a plan is made flexible by the use of composed activities that enable optional execution or choice between candidate activities. Whether an optional activity is executed and which alternative activity is chosen are context-dependent decisions.

Besides the flexibility of the timing of the execution of activities it may be necessary to adapt the plan when particular circumstances occur. Indeed a nominal plan conveys the rough course of intended steps to go through under normal circumstances. The specification of when and what changes should be made to a nominal plan is called a conditional adjustment. The trigger for a conditional adjustment is either a calendar condition that becomes true when a specific date is reached, or a state-related condition that becomes true when the current circumstances match this condition. The adjustment can be any change to the nominal plan such as the deletion or insertion of activities. It can also affect the resources used in some activities. Actually a conditional adjustment can also specify a change to be made to conditional adjustments themselves. By this means, the management can be reactive and thus cope with unexpected (though still feasible) fluctuations of the external environment (e.g. drought) and various contingencies.

3.2.4.3. Examples of operations, primitive and composite activities and conditional adjustments

The model includes a wide range of activities corresponding either to daily routine work e.g. distributing stored food, moving a grazing herd batch, etc. or to seasonal work, e.g. mating, weaning calves, selling animals, etc. Let us take the example of hay-making on a farm. This is composed of two steps, i.e. two primitive activities, first cutting the herbage of a grassland plot and, once it is dry enough, storing this new-mown hay. For the cutting activity, the object operated by the cut (the something-to-be-done component) is a plot, in particular the

component herbage, and the executor is the farmer equipped with his tractor and mower. The speed of the something-to-be-done component is a harvestable area per unit time. Its effect is the creation of a harvested herbage, the initialization of a drying process on this harvested herbage, and the re-initialization of the herbage component of the plot with its descriptors updated (leaf area index, dry matter, growth cycle age, digestibility, etc.). For the storing activity, the object operated by the storage (the something-to-be-done component) is the harvested herbage, and the executor is the farmer equipped with his tractor, round-baler and trailer. The speed of the storage is a storable quantity of hay per unit time. Its effect is the crediting of the amount of hay stored in the barn by the harvested quantity minus some losses to the yield associated with the whole hay-making process. Storing of harvested herbage can occur only once cutting is complete. Thus hay-making is a sequence of two primitive activities which can be written:

hay-making = before (cutting:

operation: cut with mover

operated object: plot

performer: farmer

storing:

operation: store with tractor, round-baler and trailer

operated object: harvested herbage created in cut

performer: farmer)

The opening of any hay-making activity, and consequently of the cutting activity, has to occur within a particular time range delimited by a minimum and a maximum beginning date. In addition, the opening predicate refers to a minimum harvestable yield and a given phenological stage for the corresponding herbage, i.e. between stem elongation and flowering, to ensure a compromise between harvested quantity and quality. Once the opening predicate of the hay-making activity has been verified the feasibility conditions attached to the cut operation are examined. These feasibility conditions concern the bearing capacity of the grassland plot, sufficient free space in the barn to store additional hay, and a satisfactory expected air saturation deficit and rainfall in the coming days to ensure proper drying conditions in the field. No closing conditions are specified in this case to ensure completion of the hay-making activity. To summarize the hay-making aggregated activity is represented as follows:

hay-making = before (cutting, storing)

minimum beginning date = a date

maximum beginning date = a date

minimum yield to harvest = an amount expressed in kg / ha

minimum phenological stage = stem elongation expressed in degree days

maximum phenological stage = flowering expressed in degree days

Farmers seldom make hay on a single field. Instead, they do it on a set of fields generally chosen for their proximity, i.e. belonging to the same islet. The execution of these groups of hay-making activities is constrained over time. A typical risk-limiting attitude is to make groups of plots and harvest them in sequence. Bad weather during drying then harms only the newly-mown plots. Thus, a group of activities can start only if the last hay-making activity executed in the previous group is complete. Sometimes farmers may defer groups of activities for several days to make time for daily routine work not done on the busy days of hay-making. The order of execution of the groups is mostly based on when plots are expected to reach minimum yield at harvest. The grouping of activities with an and gives flexibility in the order of execution of these activities and enables management constraints to be attached to this set, such as the delay between the two sets of fields.

The sequence of hay-making on the two groups of fields can then be written:

before (and (hay-making Field 1, hay-making Field 2, hay-making Field 3),

and (hay-making Field 4, hay-making Field 5)

in-between delay = a number of days)

Due, for example, to particular weather conditions in a given year, such a plan might be unachievable because of unsatisfactory time windows to dry the herbage in the field. Conditional adjustments are necessary to specify the changes made to the nominal plan. For instance, after some time in a showery weather period, the farmer might decide to reverse the order of the groups of hay-making activities in the sequence (before) to benefit from the lower drying requirements of herbage on fields 4 and 5. In addition, the delay between the execution of the two groups might be reduced. This conditional adjustment would then change the above activity into:

before (and (hay-making Field 4, hay-making Field 5),

and (hay-making Field 1, hay-making Field 2, hay-making Field 3)

in-between delay = a number of days)

3.2.5. From the conceptual model to a specific farm model and its use in simulation-based design

The implementation of the conceptual model in the DIESE modeling framework (Martin-Clouaire and Rellier, 2009) amounts to developing particularizations of some DIESE classes. For example, from the DIESE Entity class, particular cases such as « Plot » or « Herd » were created. From the DIESE activity class, e.g. « Distributing stored food » and « Hay-making » were created. This work led to an implemented simulation model general to the domain of grassland-based livestock systems. Going from this general model to a model of a particular livestock system is achieved by instantiating the particularized DIESE classes, e.g. from the « Plot » class, creating « plot 1 », and « plot 2 »; or from the « Moving Herd Batch » class, creating « moving Herd Batch A to plot 1 ». Articulation of the instantiated primitive activities using non-primitive ones then led to executable plans.

The openness and flexibility of the formal language used to represent the management strategies are suited to support a trial and error learning process (Fig. 13) by rapidly exploring alternative configuration of the production system and management strategies at almost no cost. Assume a configuration of the system, both hard (physical layout, dimensioning) and soft (organizational infrastructure, decision logic). Flexibility and adaptability are inherent and built in beforehand in the considered management strategy. In livestock systems, reconfiguration might concern the composition and dimensioning of land and animal resources. Other reconfigurable hard components include technology (e.g. hay drying) and resources (labor). The soft components modifiable in a reconfiguration are mainly the production plans in which activities can be added or removed, the timing flexibility attributes, the event-based adjustments, as well as the indicators used for decision making. The ability to switch appropriately between options is often more important than offering a large number of options, and sheds light on the key role of temporal aspects and timeliness of the decisions.

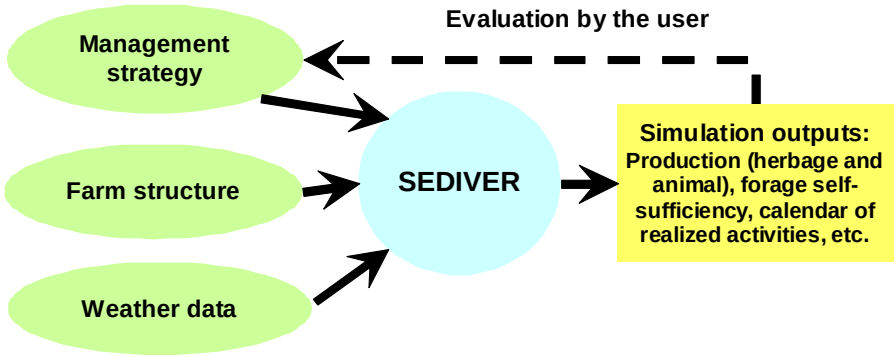


Figure 13 : The iterative loop based on simulation, evaluation and re-configuration.

3.2.6. Concluding remarks

Keating and McCown (2001) already suggested that challenges for farming system modelers are « not to build more accurate or more comprehensive models, but to discover new ways of achieving relevance to real world decision making and management practice. » In this sense, the SEDIVER project is the result of consistent efforts to improve the representation of farm management strategies and get closer to the questions raised in practice. Using the integrative conceptual framework that we have described one can develop elaborate simulation models of livestock systems. It provides a common structure to help organize and frame monitoring and management activities that can be applied effectively and consistently across the production system. Running such a simulation model under various scenarios of external conditions (weather in particular) helps to give a realistic view of the system's behavior and performance, its sensitivity to external factors and the quality of the tested management strategy as regards robustness and flexibility. We can use this approach to give a clearer meaning to the selection and prioritization of management activities by placing the management process in context. The implementation of the farm model by particularization and instantiation of the DIESE classes (Martin-Clouaire and Rellier, 2009) will be reported in future papers with a simulation-based investigation of the merits and limitations of different management strategies.

The complexity of the farmer's management task is not due to the number of components or possible states of the system but rather to the dynamic behavior of the different components which arise from their interactions over time and their dependence on uncontrollable driving factors such as weather. The dynamic complexity relates to human difficulty in dealing consistently with feedback effects, and multiple and delayed consequences of interventions. Much of the information about biophysical system functioning and the cognitive process involved in production management resides in the mental models of farmers where it remains tacit. By using the conceptual framework set up in the SEDIVER project one can expect to capture part of this subjective and context-specific knowledge and, in this way, make it an object of scientific investigation. Improving our ability to make this knowledge explicit and usable for formal modeling and learning can have important effects on both research and practice. Researchers are in a better position to build more complete, accurate and insightful models and practitioners can increase their awareness and mastery of organizational and management issues.

Acknowledgements

This study was partly funded by the French ANR ADD program in the framework of the project TRANS (TRANSformations de l'élevage et dynamiques des espaces, ANR-05-PADD-

003) and by the French ANR VMC program in the framework of the project VALIDATE (Vulnerability Assessment of LIvestock and grasslanDs to climAte change and exTreme Events, ANR-07-VULN-011). The authors would like to thank J.P. Theau and O. Therond who, as specialists of livestock farming systems, contributed to this research.

3.3. A simulation model to design flexible grassland-based livestock systems

G. Martin[1,2,*], R. Martin-Clouaire[2], J.P. Rellier[2], M. Duru[1]

[1]: INRA, UMR 1248 AGIR, F-31326 Castanet Tolosan, France

[2]: INRA, UR 875 UBIA, F-31326 Castanet Tolosan, France

[*]: Corresponding author at: INRA, UMR 1248 AGIR, F-31326 Castanet Tolosan, France. Tel.: +33 5 61 28 54 75; fax: +33 5 61 73 55 37. E-mail address: guillaume.martin@toulouse.inra.fr (G. Martin).

Abstract

Grassland-based livestock farms are dynamic systems that are difficult to manage, particularly because of their sensitivity to uncontrollable environmental factors such as weather. The design of flexible livestock systems and management strategies, capable of coping with a wide range of conditions, is thus a challenging issue. We suggest that significant improvement of performance lies in a better exploitation of the management flexibility provided by plant, grassland, animal, and farmland diversity. The SEDIVER dynamic farm-scale simulation model presented in this article has been developed to evaluate such opportunities. Its originality is twofold: (i) the modeling of management strategies as the planning and situated coordination of activities in time and space through which the farmer controls the processes occurring within the system; (ii) a representation of diversity in plant, grassland, animal, and farmland, and its consequences on the dynamic heterogeneity of biophysical processes. An application to a grassland-based beef system in France shows that more flexible strategies, paying increased attention to plant and grassland diversity, could roughly double forage yields and thus ensure farm self-sufficiency for forage. Such a model offers promising opportunities to reinforce the practical relevance and realism of farming systems designed and evaluated by simulation and their credibility to the stakeholders concerned.

Keywords:

simulation / farm model / management strategy / planning / coordination of activities / flexibility / grassland / functional diversity

3.3.1. Introduction

In less-favored areas, livestock production involves the management of a wide diversity of semi-natural grasslands as a resource base for animal production. Grassland-based livestock farms are notoriously complex systems to manage. Herbage production is highly variable in

space and time (Pleasants et al., 1995) due to between-field differences in vegetation types resulting from differences in management intensity and environmental factors, mainly soil conditions and topography. Weather variability within and between years is another cause. Similarly, livestock feeding requirements change over time and between livestock classes (INRA, 2007). In practice, grassland use by livestock grazing or mowing can hardly be synchronized on all plots at a time to exploit the current herbage production. This is because the peak of herbage production in spring is not accompanied by a corresponding increase of livestock feeding requirements, and because grassland uses share production resources such as labor and machinery. Through organizational and in-situation decision-making, farmers combine planned and reactive behavior in order to make efficient and opportune use of herbage production. In this way, they organize their activities in time and space. Their overall objective is to secure the feeding of the herd in compliance with desired, attainable and currently usable herbage production. Thus, flexibility in farm management to cope with a wide range of system states and production contexts is a key determinant of system performance (Darnhofer et al., 2008).

There is a lot of room for improvement in the efficiency of the use of herbage production on many farms. We suggest it lies on a better exploitation of the flexibility provided by plant, grassland, animal, and farmland diversity. Indeed, these constitute a potential source of flexibility that can be used in organizational and situated management choices at field and farm scale to cope with variation in uncontrollable factors such as weather (e.g. White et al., 2004; Andrieu et al., 2007b; Martin et al., 2009a). For instance, grassland diversity means that particular fields may be suitable for allocation to various forms of uses according to context-specific grassland production to match the feeding requirements of different livestock classes (e.g. cows vs. heifers) characterized by different and fluctuating animal intake rates (White et al., 2004). In addition to this organizational flexibility, within-field plant diversity makes it possible to take advantage of timing flexibility in grassland management (Martin et al., 2009a), i.e. the extent to which the use of a given grassland may be brought forward or deferred at various times of year.

To design more flexible livestock systems in collaboration with extension services and farmers, simulation models are promising learning tools (McCown, 2002a). To ensure that the systems designed and evaluated by simulation are relevant and realistic in practice, and credible to all the stakeholders, day-to-day farm operations need to be part of the model in order to deal with real practical questions such as « what should I do, where, when and how? » Such a model might then pay particular attention to the variability of biophysical processes in time and space, the constraints on grassland use, and how the farmer copes with them in planning and coordinating farming activities. Simulation-oriented farm models for designing dairy and beef systems in temperate areas are numerous (e.g. Cros et al., 2004;

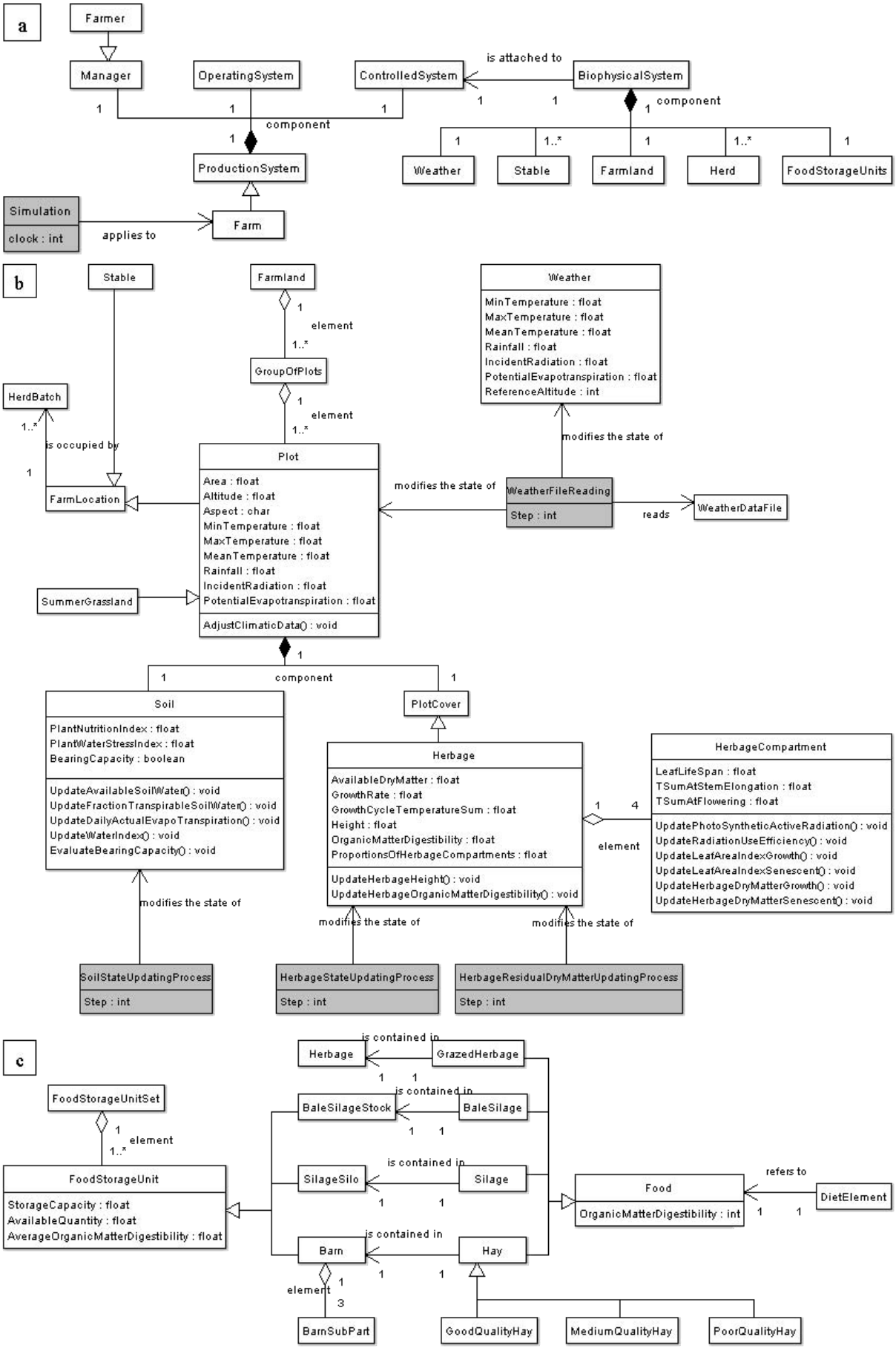
Romera et al., 2004; Jouven and Baumont, 2008). However, none satisfies the above conditions to provide a sufficiently detailed and explicit representation of management strategies, which is the main way to improve the realism of the designed systems (Keating and McCown, 2001). To overcome these shortcomings, we have built SEDIVER (Simulation-based Experimentation on livestock systems with plant, grassland, animal and farmland DIVERsity), a farm-scale simulation model tailored to realistically reproduce the dynamic interactions between biophysical and management processes. The purpose of this article is to present this simulation model and an application of it to demonstrate its potentialities. In Section 3.3.2., the system is briefly described as guided by the foundations underpinning the approach. Section 3.3.3. describes the simulation model design and implementation. In Section 3.3.4., the performance of the simulation model is evaluated on a case study, and an alternative management strategy is tested against this reference system.

3.3.2. A model based on an ontology of agricultural production systems

3.3.2.1. Model overview

SEDIVER is a dynamic farm-scale simulation model which aims to assist in the design and evaluation of more flexible livestock systems through increased consideration of plant, grassland, animal, and farmland diversity. It is intended to be used by researchers and occasionally with farm advisors and/or farmers, to check the local relevance of the simulated systems. Currently, it is parameterized for grassland-based beef systems of European temperate areas with rustic livestock breeds (e.g. Salers, Gasconne, Aubrac). It simulates the behavior of such a managed system over different weather series. The novelty of the approach is twofold: (i) a representation of the farmer's management behavior on a daily scale through the planning and situated coordination over time and space of the activities whereby the farmer controls the biophysical processes occurring in the system's components. It takes into account the constraints to the execution of these activities (time dependencies, production-system-state-related constraints), and organizational and operational flexibilities in farm management, i.e. freedom in the implementation and modification of a management strategy over time and space; (ii) a representation of diversity in plant, grassland, animal, and farmland, its consequences for the dynamic heterogeneity of biophysical processes, the subsequent constraints to herbage use and finally on system performance in a versatile farm-scale model.

In SEDIVER, the production system is seen as a complex system that can be broken down into interacting, or interdependent subsystems made up of interacting and interdependent entities that form a complex whole (Fig. 14a). The biophysical system is regarded as a set of managed entities, in particular the fields, the forage stocks and the animals, and interacting


a
Farmer
Manager
OperatingSystem
ControlledSystem
is attached to
BiophysicalSystem
component
ProductionSystem
Weather
Stable
Farmland
Herd
FoodStorageUnits
Simulation
clock : int
applies to
Farm
b
Stable
Farmland
element
GroupOfPlots
Weather
MinTemperature : float
MaxTemperature : float
MeanTemperature : float
Rainfall : float
IncidentRadiation : float
PotentialEvapotranspiration : float
ReferenceAltitude : int
HerdBatch
is occupied by
modifies the state of
Plot
Area : float
Altitude : float
Aspect : char
MinTemperature : float
MaxTemperature : float
MeanTemperature : float
Rainfall : float
IncidentRadiation : float
PotentialEvapotranspiration : float
AdjustClimaticData() : void
FarmLocation
WeatherFileReading
Step : int
reads
WeatherDataFile
SummerGrassland
Soil
PlantNutritionIndex : float
PlantWaterStressIndex : float
BearingCapacity : boolean
UpdateAvailableSoilWater() : void
UpdateFractionTranspirableSoilWater() : void
UpdateDailyActualEvapoTranspiration() : void
UpdateWaterIndex() : void
EvaluateBearingCapacity() : void
PlotCover
Herbage
AvailableDryMatter : float
GrowthRate : float
GrowthCycleTemperatureSum : float
Height : float
OrganicMatterDigestibility : float
ProportionsOfHerbageCompartments : float
UpdateHerbageHeight() : void
UpdateHerbageOrganicMatterDigestibility() : void
HerbageCompartment
LeafLifeSpan : float
TSumAtStemElongation : float
TSumAtFlowering : float
UpdatePhotoSyntheticActiveRadiation() : void
UpdateRadiationUseEfficiency() : void
UpdateLeafAreaIndexGrowth() : void
UpdateLeafAreaIndexSenescent() : void
UpdateHerbageDryMatterGrowth() : void
UpdateHerbageDryMatterSenescent() : void
SoilStateUpdatingProcess
Step : int
HerbageStateUpdatingProcess
Step : int
HerbageResidualDryMatterUpdatingProcess
Step : int
c
FoodStorageUnitSet
element
FoodStorageUnit
StorageCapacity : float
AvailableQuantity : float
AverageOrganicMatterDigestibility : float
Herbage
is contained in
GrazedHerbage
BaleSilageStock
BaleSilage
SilageSilo
Silage
Barn
Hay
Food
OrganicMatterDigestibility : int
refers to
DietElement
BarnSubPart
GoodQualityHay
MediumQualityHay
PoorQualityHay

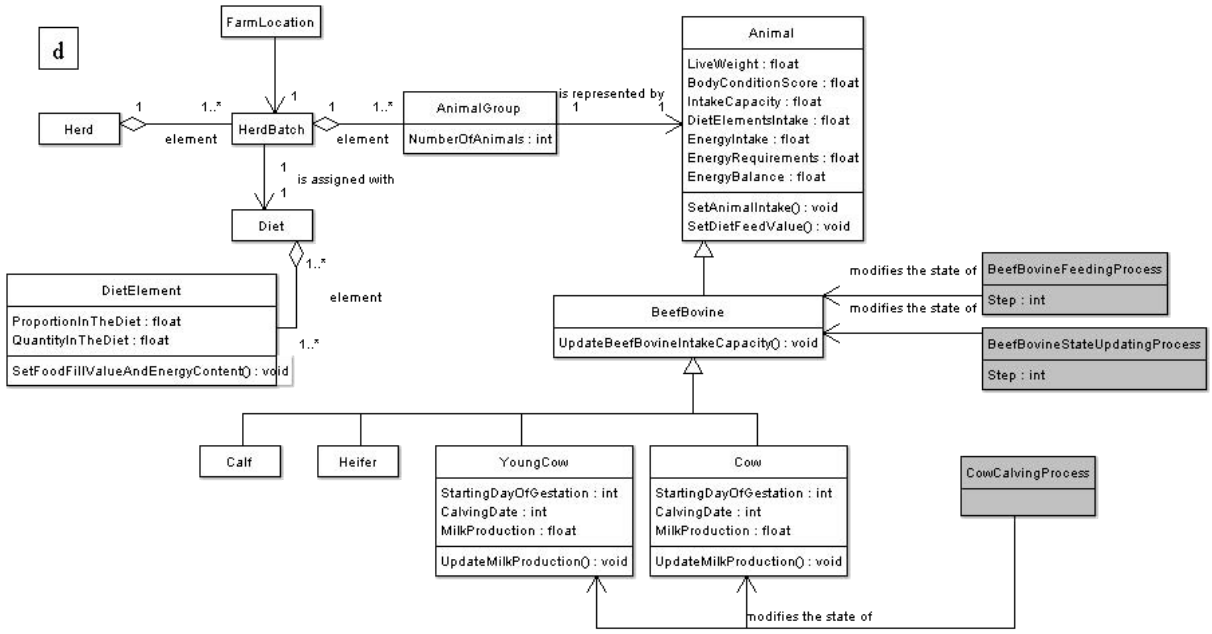


Figure 14 : Class diagrams of the biophysical model (a) and the three main modules (Farmland: b, FoodStorageUnitSet: c, Herd: d) displaying the SEDIVER classes derived from the DIESE Entity (white frames) and Process (grey frames) classes and the relations between them, in Unified Modelling Language. Each frame represents a SEDIVER class, with its name in the upper part of the frame. Lines beginning with a full diamond refer to composition relationship, i.e. objects of higher level having a "has a" owner relationship with objects of lower level. Lines beginning with an empty diamond refer to sets of lower level element objects. Arrows with an empty triangle refer to specialization relationship, the lower level object being a particular type of the higher level object. Standard arrows refer to association between two classes implemented through the attribute of one class that refers to another class.

processes such as herbage growth, animal intake and growth. The manager is an explicit system that makes decisions and implements them as actions. The simulation model harnesses this structure and the interactions between subsystems, in particular those occurring between the weather, the biophysical system, and the farmer's decisions and actions. This is supported by the modeling framework DIESE (DIscrete Event Simulation Environment) that relies on a generic conceptual model of agricultural production systems (Martin-Clouaire and Rellier, 2009).

3.3.2.2. The ontology of agricultural production systems and the modeling framework

With the exception of few cases (e.g. van Ittersum et al., 2008), agricultural simulation models are generally based on a programming language, the conceptual model being translated into executable code through procedural programming. At the core of the program is a collection of variables, data structures, and subroutines. This approach limits reusability of the code even when the implemented concepts are shared by a modeling

community. In contrast, the Object Modeling Technique for model analysis and design emphasizes the role of objects as being the primary concern in the programming task. An object is a structure that contains variables and functions named attributes and methods, i.e. valued data and a set of messages that operate on this data. The data structure defines the object state and the set of messages determines its behavior or a functional piece of knowledge about the object. This approach is especially suited for the declarative modeling of complex systems with numerous interacting components. This is why it is also the approach mostly used for modeling and simulation of livestock systems (e.g. Romera et al., 2004). The DIESE modeling framework stems from an Object Modeling perspective. The ontology of agricultural production systems (Martin-Clouaire and Rellier, 2009) serves as a conceptual meta-model supporting the modeling framework. It contains a number of pre-formalized concepts, templates and mechanisms describing the studied system components at a high level of abstraction. The DIESE modeling framework is the implementation of the ontology through a C++ library of pre-programmed classes and services. It emphasizes a discrete event simulation approach to represent the continuous and discontinuous features of the simulated system. The modeling enterprise relies on the ontological concepts, templates and mechanisms by particularizing, instantiating and then mapping these into an executable dynamic model of a specific system. The ontology considerably eases model development and implementation for non-computer-specialists, as the frame helps in clarifying how to organize the expert knowledge about the system of interest in the knowledge base.

The three fundamental concepts of the ontology are: entity, process and event (Fig. 15). These represent the structural, functional and dynamic aspects of a system respectively (Rellier, 2005). An entity describes a kind of material or abstract item in the area of interest. The state of a system at a given moment in time is the value of the slots of the entities it comprises. A process is a specification of part of the behavior of a system, i.e. of the entities composing it. Typically, the process code specifying this behavior includes the use of methods attached to entities affected by the process. A process causes a change in state when a particular event occurs. Thus, events convey the temporality of process triggers.

For managerial aspects, the ontological basic unit of analysis is work activity. In its simplest form, an activity, then called a primitive activity, is a specialization of entity (Fig. 15). It denotes something to be done to a particular biophysical object or location, e.g. a plot, by an executor, e.g. a worker, a robot or a set of these. A primitive activity is characterized by local opening and closing conditions, defined by time windows and/or predicates (Boolean functions) referring to the biophysical states or indicators. The « something-to-be-done » component of a primitive activity is an intentional transformation called an operation, e.g. the harvest operation. The step-by-step changes to the biophysical system as the operation is

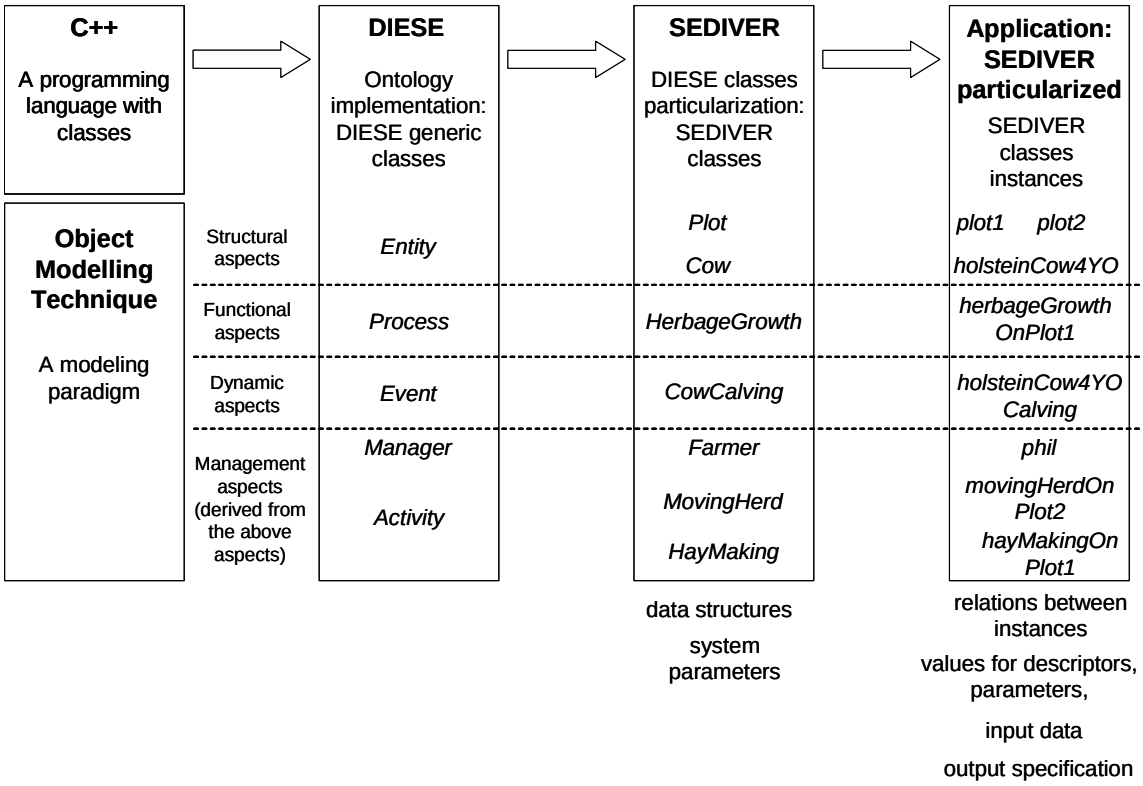


Figure 15 : Successive levels of knowledge involved in ontology-based modeling, from a programming language until a model of a particular system.

carried out constitute a functional attribute of the operation. Operations can be instantaneous or durative, which implies that their execution might be interrupted. In the latter case, the duration of the operation is determined by the product of a quantity e.g. number of items or area, and the speed of execution of the operation e.g. number of items or area which can be processed in a unit of time. Execution of an operation is constrained by feasibility conditions that relate to the biophysical system state.

Whenever a combination of activities must be undertaken with a view to achieving a pre-conceived result, some flexible and adaptable plan is needed to express how those composite activities should be coordinated. To this end, the ontology holds a set of programming constructs having evocative names such as *before*, *iterate*, and *optional*, that enable specification of temporal ordering, iteration, aggregation and optional execution of primitive activities into non-primitive or aggregated activities. A plan may encounter situations where the initial intention is beyond its bounds as particular events occur, e.g. a lasting drought event. The specification of when and what changes should be made to a nominal plan is called a conditional adjustment. The triggering part of conditional adjustment is either a calendar condition that becomes true when a specific date is reached, or a state-related condition that becomes true when the current circumstances match this condition. The adjustment can be any change to the nominal plan such as the removal or insertion of

activities. It can also affect the resources used in some activities. By this means, management can be reactive and thus cope with unexpected (though still feasible) fluctuations of the external environment and various contingencies.

3.3.2.3. Successive steps in designing, implementing and using a model based on an ontology

The modeler aspiring to design a model in a modeling framework such as DIESE needs basic skills in C++ programming, knowledge about the use of the DIESE interface, and overall expertise about the system to be modeled. The simulation model design consists of an iterative loop between modeling, programming, and use through simulation. Modeling (reported in this case in Martin et al., 2009b) is giving a formal expression of the system analysis by identifying the domain classes derived from the DIESE library, i.e. the SEDIVER classes, and if needed, their attributes corresponding to a descriptor or a method. It also requires specifying the relations between the SEDIVER classes, these relations being hierarchical, structural or functional. Programming the simulation model is a matter of declaring the domain classes, their relations and attributes, data structures and system parameters in a knowledge base by using the pre-programmed classes and services of the DIESE modeling framework. A knowledge base is that part of the simulation model where knowledge about the system of interest is declared. It is independent from the part where this knowledge is exploited by a simulation engine. The expected benefits of modeling by ontology are extra completeness, conciseness and consistency of the model. Modeling and programming lead to a particularization of the abstract DIESE library by adding a second knowledge layer (the first being the DIESE framework, Fig. 15) that restricts the validity domain of the SEDIVER knowledge base to grassland-based beef systems of temperate areas. The third knowledge layer particularizes the general SEDIVER knowledge base to a case study system by instantiating the SEDIVER classes installed, declaring the relations between instances and their attributes. Running a simulation consists of firing the simulation engine that is designed to recognize in the knowledge base some changes that are ready to be applied and to develop specifications into effective change in the state of the system. It requires a time step to be specified for the simulation and the addition of data files such as weather series, valuing system parameters and entities' attributes, etc.

3.3.3. Knowledge base content

3.3.3.1. The model of the biophysical system

3.3.3.1.1. Overview

A general overview of the SEDIVER classes is given in Figure 14a. Later in the text, class names start with a capital letter (e.g. *GroupOfPlots*), whereas names of class instances start with a lower case letter (e.g. *groupOfPlots1*). The *BiophysicalSystem* class of a grassland-based beef system is composed of five entities, i.e. a farmland, one or several herds, food storage units, one or several stables, and weather. Indeed this system is weather-driven. The farmer's operations, determined by his situated decisions (i.e. including considerations for the biophysical system state and weather) according to a pre-determined management strategy, modify the system state.

3.3.3.1.2. The *Farmland* module

The entity *Farmland* (Fig. 14b) represents a set of land islets named « group of plots ». *GroupOfPlots* represents a set of *Plot*. *SummerGrassland* is a specialization of *Plot*, representing large plots located at high altitude used for summer grazing. Area, altitude, and aspect, i.e. flat, south- or north-oriented, are descriptors of *Plot*. The continuous process *WeatherFileReading* updates the state of *Weather* daily, and according to altitude and exposure, a method (*AdjustClimaticData*) encapsulated in this process adjusts incoming temperature and incident radiation read in the weather file at the plot scale. The extent of these adjustments is context-dependent and might be calibrated for each application through simulation input parameters. This method also calculates thermal time or degree-day sums according to the method proposed by Ansquer et al. (2009a) for species-rich grasslands. *Plot* thus shares a number of climatic descriptors with *Weather* (Fig. 14b). A plot is made up of two interacting components, represented by entity classes *Soil* and *PlotCover*, in this case, *Herbage*.

Soil is described by three main attributes, a plant nutrition index, a plant water stress index and soil bearing capacity. The continuous process *SoilStateUpdatingProcess* operating on the *Soil* (Fig. 14b) updates their dynamics daily. The plant nutrient stress index based on Lemaire and Gastal (1997) represents the extent of soil nitrogen and phosphorus limitation experienced by the plant in achieving the potential growth permitted by local weather conditions. It is based on a field measurement in a given year for the first growth cycle in spring. Soil nitrogen mineralization rate varies throughout the year and results in variability of plant nutrition. The plant nutrient stress index fixed as input is thus adjusted during the season based on an empirical relation. The plant water stress index relies on the fraction of

transpirable soil water approach and is calculated as by Merot et al. (2008) using four methods that subsequently update available soil water, the fraction of transpirable soil water, daily actual evapotranspiration and finally the stress index. Evaluation of soil bearing capacity according to Andrieu et al. (2007b) is encapsulated in a method (*EvaluateBearingCapacity*).

Herbage represents grassland vegetation. Its state mainly changes through daily updated descriptors, mainly available dry matter, growth rate, growth cycle age in degree-days, height, and organic matter digestibility according to physiological and phenological attributes, i.e. leaf life span, temperature sum at stem elongation and flowering, that depend on plant species composition of the herbage and govern the dynamics of herbage growth and digestibility. Semi-natural grasslands are complex agrosystems composed of a wide variety of plant species. To account for this diversity, the concept of functional composition defined in plant ecology is quite helpful. In this approach, species are classified into groups that relate directly to function (primary production role) based on shared biological characteristics (plant traits) concerning plant morphology, physiology and phenology. The leaf dry matter content weighted at plant community level is well correlated with agronomic characteristics like herbage digestibility (Al Haj Khaled et al., 2006) and plant phenology (Ansquer et al., 2008). *Herbage* is seen as a set of four compartments (Fig. 14b) or grass functional groups (entity *HerbageCompartment*) based on Ansquer et al. (2004), with the relative abundance of each compartment as a descriptor of *Herbage* defined as a model input.

The continuous process *HerbageStateUpdatingProcess* operates with a daily time step on the *Herbage* for updating its descriptors (Fig. 14b). First, it brings up to date available herbage dry matter based on a modified version of the model of Duru et al. (2009a). In this model, six main functions can be distinguished: capture and conversion of radiation, leaf area index growth and senescence, herbage dry matter growth and senescence. All six have been incorporated in the process through separate methods of *HerbageCompartment*. Once herbage dry matter has been updated for each compartment, it is integrated at the *Herbage* level using the relative abundance of each compartment. Along with the changes in herbage dry matter availability, the density of herbage stratum is also modified. For example, autumn tillering of grass species increases the density of the bottom few centimeters of herbage. Thus, to convert the modified herbage dry matter availability model of Duru et al. (2009a) into a usable herbage dry matter availability model, an additional continuous process (*HerbageResidualDryMatterUpdatingProcess*) with a daily time step operates on the *Herbage*. It models herbage dry matter in the ungrazable stratum, e.g. below 6 cm for beef bovines. It relies on an empirical relation driven by a baseline parameter representing herbage dry matter of the ungrazable stratum for the most productive and early herbage compartment in spring. It is adjusted throughout the year according to seasons, and to the distribution of

herbage compartments. A model based on published data (Duru and Ducrocq, 1998) updates herbage height (method *UpdateHerbageHeight*) according to the difference between available herbage dry matter and herbage dry matter in the ungrazable stratum. The model of Duru et al. (2008c) contained in a method (*UpdateHerbageOrganicMatterDigestibility*) updates herbage organic matter digestibility.

3.3.3.1.3. The *FoodStorageUnitSet* module

The entity *FoodStorageUnitSet* (Fig. 14c) represents a set of food storage units (entity *FoodStorageUnit*), which can be *Barn*, *SilageSilo*, or *BaleSilageStock*. Storage capacity is the unique container feature. A particular type of food is contained in each type of food storage unit. Food stock in each food storage unit is described by an available quantity and average organic matter digestibility. It changes each time a harvest, a purchase, a sale or a distribution occurs, but no continuous process operates on this class. *Barn* is a set of three elements of class *BarnSubpart* containing good quality (organic matter digestibility up to 0.65 $kg.kg^{-1}$), medium quality and poor quality (organic matter digestibility less than 0.55 $kg.kg^{-1}$) hay respectively.

3.3.3.1.4. The *Herd* module

The entity *Herd* (Fig. 14d) represents the livestock component of the biophysical system. It can be further broken down into herd batches (*HerdBatch*), that is, a functional entity managed by the farmer as regards diet, movements, sale, etc. *HerdBatch* is a multiple population made of simple homogeneous populations of *AnimalGroup*, i.e. a number of animals from the same animal category (calf, heifer, young cow, or cow) sharing breed, age, physiological state, body condition score and productive function. Each group is thus described by a representative animal (entity class *Animal* and its specializations, *BeefBovine,* which can be *Calf*, *Heifer*, *YoungCow*, or *Cow*). Each animal is represented by morphological descriptors, i.e. live weight and body condition score, feeding descriptors, i.e. intake capacity, intake quantities of each diet element (entity *DietElement*) contained in the diet (entity *Diet*) assigned to the encompassing herd batch, and physiological descriptors, i.e. net energy intake, consumption and balance. In the case of *YoungCow* and *Cow*, additional descriptors characterize the reproductive status by keeping track of the starting date of gestation, the last calving date, whether or not a calf is still suckling, and if so, the current milk production.

The INRA fill unit system (INRA, 2007), a feed evaluation and rationing system for protein and energy, has been implemented in the continuous process *BeefBovineFeedingProcess*. It models on a daily time step animal feed intake according to animal type through four methods. The first one updates animal intake capacity according to morphological

characteristics and reproductive status (*updateBeefBovineIntakeCapacity*). The second one calculates nutritive value, i.e. fill value and energy content, of each diet element based on its organic matter digestibility (*setFoodFillValueAndEnergyContent*). The third one sets animal intake for each diet element given animal intake capacity, fill value and proportions or quantities of each element in the diet, and availability or distributed quantity of the considered diet element (*setAnimalIntake*). The fourth one calculates net energy intake, given the quantities and nutritive values of diet elements ingested by the animal (*setDietFeedValue*). Once the characteristics of feeding are evaluated, its conversion into animal products (weight, milk) is modeled on a daily time step in the continuous process *BeefBovineStateUpdatingProcess*, based on Jouven et al. (2008). According to the location of the processed animal (stable, plot, or summer grassland), and given its live weight and body condition score, this process calculates net energy for maintenance, and net energy for gestation and lactation in the case of cows. These rely on the stage of cows in both cycles, i.e. the number of days since the beginning of the cycle. Daily milk production is updated by a method (*UpdateMilkProduction*). Finally, net energy balance is converted into gain or loss of live weight and body condition score.

The discrete process *CowCalvingProcess* initialized by an event of class *CowCalvingEvent* proceeds to the creation of a new group of calves attached to the corresponding group of mother cows. The size of the group is the number of mother cows corrected by a factor to account for birth mortality. The newly created group of calves is added to the herd batch of the mother cows. This process also updates the reproductive status of the representative cow of the mother cow group through the descriptor calving date, and initiates lactation.

3.3.3.2. The models of the decision and operating systems

3.3.3.2.1. An overall structure of the decision process

Farm management over the years (non primitive activity *PluriannualManagement*) is seen as an iteration derived from the DIESE class *ActivityIteration*, of a non primitive activity, i.e. an annual management plan. The annual management plan should be repeated within the time during which *PluriannualManagement* is open, e.g. ten times if one wants to simulate ten years of operation. The iteration procedure duplicates the annual management as needed in compliance with the maximum number of iterations, if provided. This duplication occurs after a wintering and a grazing and harvesting period, once all forage harvests have been made when the whole herd is returned to the stable for wintering again, which is considered a key event in the production year.

On the production year scale, the manager's activities are aimed either at producing forage stocks, or at taking care of herd batches through animal feeding, reproduction, etc. These can

be grouped into two non-primitive activity classes *YearlyHarvestingSequence* of which a single instance can be declared, and *HerdBatchManagement* of which several instances can be declared. Instances of these composed activities are conducted in parallel. Each has a dedicated and independent activity plan, although the execution of one plan can affect that of the others, e.g. because of concurrent use of certain machinery. Thus, non-primitive activity *AnnualManagement* is derived from the DIESE class *ActivityConjunction* that groups together activities without further constraints between them. An example of an instance of *AnnualManagement* is provided in Figure 16.

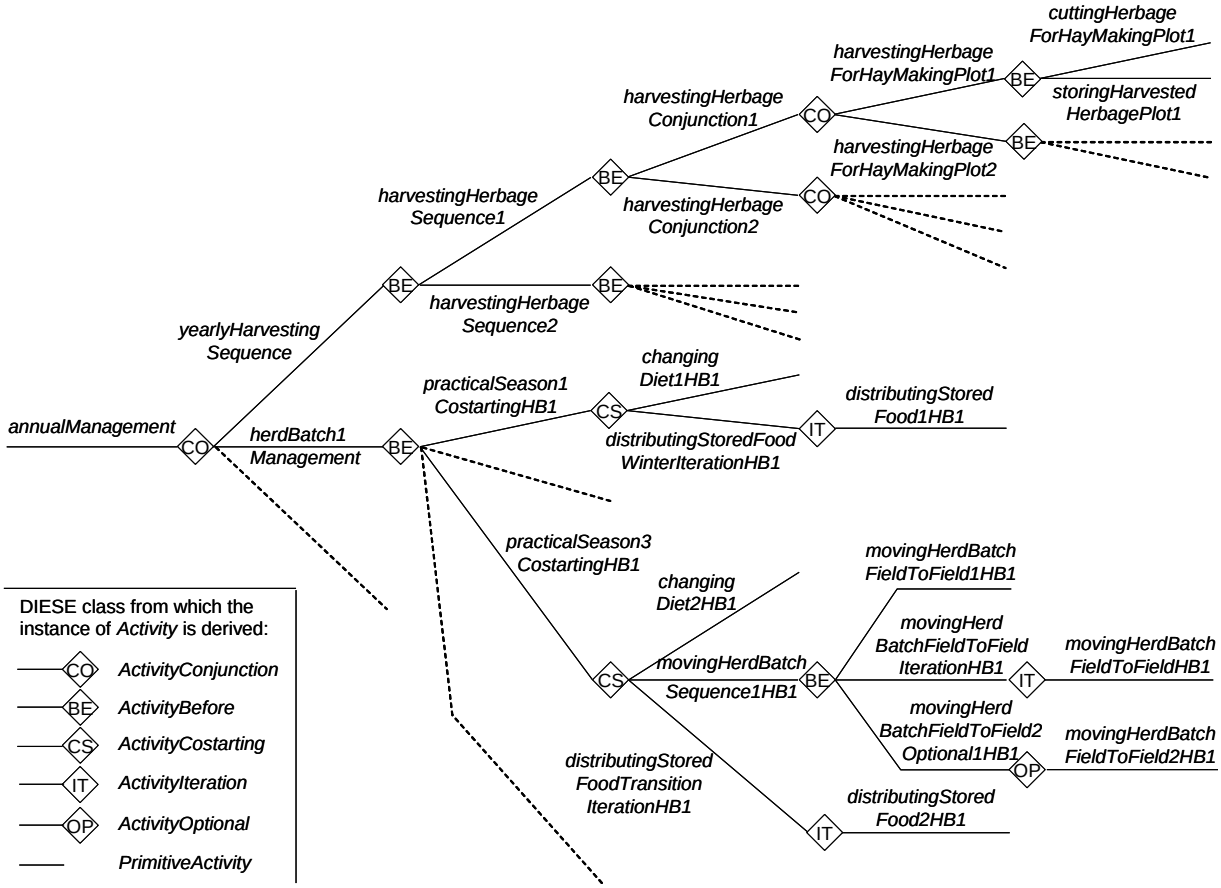


Figure 16 : Schematic example of an instance of SEDIVER non-primitive activity class *AnnualManagement* with possible components. Instance name is similar to the class name mentioned in the text. Dashed lines refer to unrepresented components of the plan.

3.3.3.2.2. A structure for yearly forage stock production

Over a year, forage stock production can be regarded as a sequence of harvests. It is represented by the-non primitive activity *YearlyHarvestingSequence* derived from the DIESE class *ActivityBefore*. This sequence is itself a set of sequences (*HarvestingHerbageSequence*), e.g. a first harvest on a set of plots followed by a second harvest on the same plots, constrained by earliest and latest starting dates. Indeed, the execution, for example, of the second harvest

on a set of plots, requires that the first harvest is begun early enough to leave time for herbage regrowth. By experience, farmers plan their harvesting activities so that their occurrences are compatible with the timing of other duties and are not jeopardizing subsequent harvesting activities. Farmers seldom perform harvesting activities on a single plot at a time. Instead, they harvest a set of plots generally constituted according to their proximity, here named *HarvestingHerbageConjunction* (derived from the DIESE class *ActivityConjunction*). The realization of this conjunction is constrained over time by the higher level class *HarvestingHerbageSequence*. Its opening can occur only if the last harvesting activity executed in the previous conjunction has been fully completed. Sometimes, farmers even leave a delay between doing two *harvestingHerbageConjunction* in order to keep time for the daily routine work left aside on the busy days of harvesting. The grouping of activities with a *HarvestingHerbageConjunction* gives flexibility in the order of execution of these activities and enables management constraints to be attached to this set, such as the delay between the two sets of plots.

A *HarvestingHerbage* activity is a sequence derived from the DIESE class *ActivityBefore*. It consists of two steps, i.e. two primitive activities, first cutting the herbage (*CuttingHerbage*) of a grassland plot and then storing this new-mown herbage (*StoringHarvestedHerbage*). *HarvestingHerbage* has three specializations according to the type of food made from the harvest, i.e. hay, bale silage or silage. *HarvestingHerbage* can be declared as optional (non-primitive activity *HarvestingHerbageOptional)*. It means that if the *HarvestingHerbage* activity cannot be executed, e.g. if it is too late with respect to the *HarvestingHerbageSequence* opening interval or if harvest yield is expected to be too low, it is cancelled in the activity plan.

For the *CuttingHerbage* activity, the object operated on by the operation *CutHerbage* is the component herbage of a plot, and the executor is the farmer equipped with his tractor and mower. The speed of the operation component is a harvestable area per time unit. Its effect is the creation of an instance of entity *HarvestedHerbage* that inherits from *Herbage* descriptors before the cut (quantity corrected by the biomass remaining on the plot, digestibility, dry matter content), the updating of *Herbage* descriptors (residual leaf area index, herbage dry matter, and herbage height, growth cycle age in degree days) on the harvested plot, and in the case of hay-making, the initialization of a continuous process *HarvestedHerbageDryingProcess* (based on Duru and Colombani, 1992) on the new harvested herbage. The opening predicate of any *CuttingHerbage* activity, and consequently of the encompassing *HarvestingHerbage* activity, refers, in addition to the conditions imposed by higher level activities, to biophysical states. Such states are a minimum harvestable yield, a phenological stage or regrowth duration for the corresponding herbage, or a combination of these. The feasibility conditions attached to the *CutHerbage* operation concern sufficient free space in the barn to store additional material, and in the case of hay-making, a satisfactory

expected air saturation deficit and rainfall in the coming days to ensure proper drying conditions of the harvested herbage on the plot.

For the *StoringHarvestedHerbage* activity, the object operated on by the operation *StoreHarvestedHerbage* is the harvested herbage, and the executor is the farmer equipped with his tractor, round-baler and trailer. The speed of the storage is a storable quantity of harvested herbage per time unit. Its effect is the crediting of the amount of food stored in the *foodStorageUnit* by the harvested quantity minus some yield losses associated with harvesting. Storing of harvested herbage can occur only once cutting is complete. In the case of hay-making, the opening predicate of any *StoringHarvestedHerbage* activity relies on the dry matter content of the harvested herbage. Once the herbage cut is dry enough, *StoreHarvestedHerbage* can be executed.

3.3.3.2.3. A structure for yearly herd batch management

- A set of practical seasons

For representation of yearly herd batch management, the approach emphasized is based on Bellon et al. (1999). The production year is seen as organized for each herd batch into a succession of periods named practical seasons. *HerdBatchManagement* is thus a sequence, derived from the DIESE class *ActivityBefore*, particular to a given herd batch, of practical seasons. A practical season is a period during which the farmer makes use of a similar type of food resource (e.g. growing herbage, deferred non-growing herbage, hay) with quite stable parameters (e.g. a grazing intensity, a number of cows per surface unit, an amount of food distributed), to feed the herd batch according to a given objective for the period (e.g. cow fattening through spring grazing after calving, progressively moving to summer mountain pastures). The number of practical seasons per year, their period of occurrence and content is particular to each herd batch within each farm. Between farms, it depends on the region of interest and the type of livestock system.

When focusing on management aspects, the succession of practical seasons is characterized by discontinuities of differing extent. For example, at turnout, the switch concerns at least the diet attributed to the herd batch, i.e. from a diet based on food stores to a diet based on standing herbage, and the movements of the herd batch, i.e. from standing inside the stable to moving to several successive plots. In contrast, later on, the switch between early spring and spring can only consist of changes in grazing management methods to adapt to a new type of food, e.g. growing as opposed to deferred herbage. In both cases, simultaneous changes occur in herd batch management at the beginning of each practical season. The corresponding non-primitive activity *PracticalSeasonCostarting* is thus derived from the DIESE class *ActivityCostarting*.

The duration of these practical seasons is not fixed in advance, but dictated by the weather. In fact the weather affects the state of the herbage and thus the type of food suitable for use in a given season. Switches from one practical season to another include a certain degree of flexibility to cope with year-to-year weather variability. This flexibility takes the form of two types of security: regulations and buffers. Regulations are included in the course of a practical season. They might typically consist of different durations of stay of the herd batch due to fluctuating herbage availability, or to an additional plot grazed to compensate for low expected herbage availability until the end of the practical season. Buffers are securities at the end of a practical season to fill the feeding gap until the next practical season. For instance, they might consist of an additional grazing on a plot if too little herbage is available on the plots to be grazed during the next practical season.

The changes occurring at the beginning of each practical season can concern the diet assigned to the herd batch and its constituents, the location of the herd batch and its movements, the distribution of stored food to the herd batch, the reproduction and suckling of females, and the sale of animals. In consequence, several classes of primitive activity, i.e. *ChangingDiet*, *MovingHerdBatch* (with five specializations according to the type of initial and final locations, plot, summer grassland and stable), *DistributingStoredFood*, *Mating*, *WeaningCalves*, *SellingAnimals*, can be included and coordinated in the non-primitive activity class *PracticalSeasonCostarting* (Fig. 16).

- Content of the practical seasons

Within a single practical season, a number of displacements of the corresponding herd batch are generally planned. Non-primitive activity *MovingHerdBatchSequence*, which is derived from the DIESE class *ActivityBefore*, specifies that the set of element primitive (i.e. of class *MovingHerdBatch)* or non-primitive (i.e. of class *MovingHerdBatchFieldToFieldIteration*, *MovingHerdBatchFieldToFieldOptional*) activities must be performed successively. This sequence can consist of a single element of non-primitive activity class *MovingHerdBatchFieldToFieldIteration*. This class, derived from the DIESE class *ActivityIteration*, indicates that the element activities *MovingHerdBatchFieldToField* should be repeated until the closing conditions of the iteration, i.e. a latest end date or a maximum number of iterations, are met. The opening predicate of this iteration activity refers to earliest and latest beginning dates, a maximum duration stay on the plot occupied by the herd batch, and the possibility for the grazing herd batch to be fed one more day on that plot. To account for regulations and buffers consisting of the optional grazing of a plot, non-primitive activity *MovingHerdBatchFieldToFieldOptional* has been defined. This optional activity has *MovingHerdBatchFieldToField* as element activity which, being an optional activity, is carried

out only if the opening predicate of the element activity is satisfied. This predicate relies on herbage availability on forthcoming plots in the *MovingHerdBatchSequence* or on weather conditions, mainly the absence of autumn frosts.

For the *MovingHerdBatch* activity and its five specializations, the object operated on by the operation *MoveHerdBatch* is the herd batch, and the executor is the farmer. The operation is considered instantaneous, i.e. completed in one time step, i.e. one hour. Its effect is the removal and addition of the herd batch to the list of occupiers attached to the source and destination locations respectively. In case the source location is a plot, the operation updates *Herbage* descriptors (residual herbage dry matter and leaf area index, residual herbage height, growth cycle age in degree-days). The destination location can be fully determined in the plan as a descriptor attached to the primitive activity. It can also be selected among a list of plots. In the latter case, selection of the destination can rely on herbage availability or growth cycle age according to the user's choice. The opening predicate of any *MovingHerdBatch* activity relies, in addition to the conditions imposed by higher level activities, and to earliest and latest starting dates, on biophysical states and indicators. Herbage dry matter available, herbage height, phenological stage or regrowth duration, the impossibility of keeping the herd batch grazing that plot for one more day, or a combination of these and weather conditions, are appraised for the source and destination locations. Specifications of intervals of dates or biophysical state and indicator values provide the means to represent flexibility in the timing at which activities are eligible for execution. This corresponds to regulations in the course of the practical seasons such as different herbage utilization rates permitted by different types of herbage, i.e. different distributions of herbage compartments. Feasibility conditions of the operation *MoveHerdBatch* require the bearing capacity of the destination plot to be respected, together with acceptable rainfall and minimum temperatures expected in the three coming days. The weather forecast is assumed to be reliable and checked daily.

In the course of the year, a herd batch is frequently fed with stored food for periods lasting from several days to several months. When this happens the farmer distributes this food every day. Primitive activity *DistributingStoredFood* is thus the element of non-primitive activities derived from the DIESE class *ActivityIteration*: *DistributingStoredFoodWinterIteration* and *DistributingStoredFoodTransitionIteration*. In the case of the *DistributingStoredFoodWinterIteration*, the opening and closing predicates are dependent on herd batch displacements. The opening predicate is satisfied as the herd batch returns to the stable at the end of autumn. The closing conditions are verified as turnout of the herd batch is possible in early spring, as are the opening conditions of *DistributingStoredFoodTransitionIteration*. The closing predicate of the latter responds to a maximum number of iterations or days of distribution. For the *DistributingStoredFood*

activity, the object operated on by the operation *DistributeStoredFood* is the food storage unit used for the distributed food, and the executor is the farmer. The operation is considered instantaneous, i.e. completed in one time step. Its effect is to withdraw the quantity stored in the food storage unit and to credit the quantity distributed to the herd batch.

As mentioned in connection with the distribution of stored food during the feeding transition, the diet plan of a single practical season for a herd batch can contain several successive diets. Non-primitive activity *DietChangesSequence*, which is derived from the DIESE class *ActivityBefore*, specifies the order in which the diets might be assigned to the herd batch without any further restrictions for its execution. For the *ChangingDiet* activity, the object operated on by the operation *ChangeDiet* is the herd batch through the updating of its assigned diet. Its opening predicate is connected with the opening and closing predicates of the corresponding iterations of *DistributingStoredFood*.

In the course of these seasons, three other types of primitive activity already mentioned are used. Operation class *Mate*, which is related to the primitive activity *Mating*, operates on the cows and mature heifers of a herd batch. It updates the starting day for the gestation descriptor of the operated cows and heifers and programs a *CowCalvingEvent* for these animals nine months later. The opening predicate of *Mating* relies, in addition to the conditions imposed by higher level activities, on a time interval characterized by earliest and latest starting dates. *WeaningCalves* leads through the operation *WeanCalves* to breaking down the relation installed between instances of *Cow* and *Calf* at calving. Another effect is that calves switch their diet from a mixed diet based on milk and grazed herbage to a diet based entirely on grazed herbage. Operation *SellAnimals* related to primitive activity *SellingAnimals* programs the end of the continuous processes acting on the representative animal of the animal group sold. It deletes this representative animal from the system, as well as the corresponding group and herd batch if the latter becomes nil. For *WeaningCalves* and *SellingAnimals*, their opening predicates are the combined satisfaction of earliest and latest beginning dates, animal age, live weight, and body condition score thresholds, and in the case of culling cows, of herbage and food stock availability thresholds.

3.3.3.2.4. Other activity classes

When the available quantity in entity class *FoodStorageUnit* drops below a critical availability threshold, the diet element stored within this food storage unit can be replaced in the animal diet by another diet element, e.g. good quality hay instead of medium quality hay if plenty is available. Otherwise a primitive activity *BuyingStoredFood* is inserted into the plan for the following day. The object operated on by the operation *BuyStoredFood* is the instance of entity class *BoughtFood* brought into the system. The operation effect is crediting the food storage unit concerned to the quantity of food bought, and updating the digestibility of the food

stored.

Non primitive activity *AdjustmentActivities* is derived from the DIESE class *ActivityConjunction*. Activities from this class are declared to represent conditional adjustments that substitute a part of the nominal plan when this plan encounters situations beyond its executability domain. For example, from the end of spring to the beginning of autumn, after each *movingHerdBatchFieldToField,* the availability of grazable herbage on the farm plots is evaluated. In case of severe drought, if no plot contains grazable herbage, the part of the plan attached to each herd batch through *AdjustmentActivities* replaces the nominal plan at least for the current practical season. This can be a combination of *ChangingDiet* through *DietChangesSequence, DistributingStoredFood* repeated through *DistributingStoredFoodSummerIteration* until there is again enough herbage for grazing, and *MovingHerdBatchFieldToFieldIteration* that begins once there is enough herbage for grazing.

3.3.4. An application to explore the potential for securing forage self sufficiency in French Pyrenees grassland-based beef systems

3.3.4.1. Description of the experiment

3.3.4.1.1. General objective

On the French side of the Pyrenees the climate is montane. Average annual temperature is 11.8°C and average annual rainfall is 1014 mm (for 1998-2004). The rainfall is well distributed throughout the year, although there tends to be a moderate drought during summer. Long and cold winters preclude grazing-based feeding for several months, generally from mid-November to mid-April. During that period, about half of the beef farms have access to roughly 20% of external hay supply to cover the feeding demand of their herd. Forage self-sufficiency during winter is thus a key performance factor of such systems. Farmland structure imposes heavy constraints on the organizational setup of the farms, especially on forage stock production. Indeed, it requires suitably level fields for mechanization. Thus, mechanized harvesting can only be done in the valley bottom or on gently-sloping low-lying fields. As such areas are fairly restricted, farmers often carry out successive harvests on these fields. This may not be feasible when there is a long drought. Herbage re-growth after the first harvest is insufficient for harvesting twice due to plant water stress. This may result in severe food stock shortages requiring buying-in feed in the following winter. On these farms, herbage utilization rate, i.e. the ratio of herbage grazed and harvested to the herbage grown over the year, remains low, i.e. around 50%. The SEDIVER simulation model was therefore used to evaluate an alternative form of management aimed at improving forage self-sufficiency through an improvement of herbage utilization rate.

3.3.4.1.2. Data available

In France, for each type of livestock product (e.g. lean or fattened animals) and each region, a network of farms is monitored every year by the extension services. This leads to the identification and description of a so-called « cas type » (typical case), which is an average farm, its configuration and its dynamic management for an average year's weather pattern. The simulated system has grassland-based production of 6- to 8-month-old recently-weaned beef calves (Gasconne breed) in the French Pyrenees (Institut de l'Elevage, 2006). This data was supplemented by the opinion of experts and by a survey over four farms already reported on by Coléno et al. (2005). In that survey, in addition to biophysical measurements (floristic survey, plant nutrition indices, soil depth, topographic and topological characteristics of the fields), farmers' interviews were conducted and their practices monitored over four years (1997-2000). At the beginning of each year, a schedule was devised with the farmer to probe his plans for the coming season. In the course of the year, the kind of grassland use, the dates for successive use and associated conditions such as herbage height after use, when required, the type of grazing animals, and batching choices were recorded. At the end of the year, farmers were interviewed again to evaluate the changes made to the pre-planned schedule.

3.3.4.1.3. Reference system description

The simulated farm is half of the typical case. It is 30 ha in area and rents mountain summer pastures. It has 12 ha in the valley bottom at 650 m.a.s.l., divided into eight 1.5 ha plots with fairly uniform, early and productive pastures and high plant nutrition indices. On the sloping sides of the valley, six 3 ha plots are distributed at roughly 50 m altitude intervals from 750 m.a.s.l. to 1000 m.a.s.l. Pasture production is later than in the valley bottom plots, gradually becoming later with increasing altitude. Plant mineral nutrition indices also exhibit a gradient, with the lowest values on the high altitude plots. All the area is occupied by semi-natural grasslands. It has 25 Gasconne beef cows, 5 two-year-old heifers and five one-year-old heifers. Each year, sales are 23 calves younger than 8 months in September, and 5 suckler cows for replacement in spring.

The herd is managed as two batches throughout the year, one of one- and two-year-old heifers, and one of cows and their new-born calves. Calving occurs indoors around February. Risks of snowfalls and severe frosts remain significant until early April. To avoid health problems which can occur in such weather, the animals are never turned out before early April. The heifers are the first to be moved outdoors as they are less sensitive to bad weather in the absence of calves. At turnout, these herd batches graze five valley bottom plots until there is sufficient herbage on the sloping fields. For the first few days after turnout the cattle are partly fed hay to assist with the change of diet. They are then moved up to the slopes and

```
+I movingHerdBatchSequence movingSequence_HB1SlopeSpring
   +E movingHerdBatchFieldToField movingHB1ToSlopePlot1_1stRound;
        operatedObjectAttribute = <I><, HB1>;
        // herd batch operated by the moving activity
        destinationCandidatesSpec = <I><, slopePlot1Spec>;
        // destination of the herd batch through this activity
        criteria = 2;
        // specifies that the activity depends on a maximum beginning date
        // and beforehand on the impossibility to last one more day at
        // grazing on the current plot
        maxBegDay = 10;  maxBegMonth = 5;;
   +E movingHerdBatchFieldToField movingHB1ToSlopePlot4_1stRound;
        operatedObjectAttribute = <I><, HB1>;
        destinationCandidatesSpec = <I><, slopePlot4Spec>;
        criteria = 4;
        // specifies that the activity depends on herbage height (in cm) at the
        // entrance of the destination plot, minimum and maximum duration
        // stay on the current plot and on the impossibility to last one
        // more day at grazing on the current plot
        comingHerbageEntranceHeightThreshold = 18.;;
   +E movingHerdBatchFieldToField movingHB1ToSlopePlot2_1stRound;
        operatedObjectAttribute = <I><, HB1>;
        destinationCandidatesSpec = <I><, slopePlot2Spec>;
        criteria = 4;
        comingHerbageEntranceHeightThreshold = 18.;;
   +E movingHerdBatchFieldToField movingHB1ToSlopePlot3_1stRound;
        operatedObjectAttribute = <I><, HB1>;
        destinationCandidatesSpec = <I><, slopePlot3Spec>;
        criteria = 4;
        comingHerbageEntranceHeightThreshold = 18.;; …
```

```
+I movingHerdBatchSequence movingSequence_HB1SlopeSpring
    +E movingHerdBatchFieldToField movingHB1ToSlopePlot1_1stRound;
         operatedObjectAttribute = <I><, HB1>;
         destinationCandidatesSpec = <I><, slopePlot1Spec>;
         criteria = 7;
         // specifies that the activity depends on a phenological threshold
         // on the current plot and beforehand on the impossibility to last
         // one more day at grazing on the current plot
         herbagePhenologicalStageThreshold = 600.;;
    +E movingHerdBatchFieldToFieldIteration movingHB1ToSlopePlotIteration
         maxEndDay = 10;  maxEndMonth = 9;
         closeToOpenDelays << (96 MAX); // 96 hours -> 4 days
         // specifies that at least a 4 days delay might occur before iterating
         // again
         +E movingHerdBatchFieldToField movingHB1ToSlopePlot;;
         // primitive activity iterated by movingHB1ToSlopePlotIteration
+ I operatedObjectSpecification multipleDestSpec
    preExpandedList << <I><, slopePlot3>;
    preExpandedList << <I><, slopePlot4>;
    preExpandedList << <I><, slopePlot5>;
    preExpandedList << <I><, slopePlot6>;;
// list of plots among which the destination plot of the iterated activity
// movingHB1ToSlopePlot is selected
<I><movingHerdBatchFieldToField movingHB1ToSlopePlot>
    operatedObjectAttribute = <I><, HB1>;
    destinationCandidatesSpec = <I><, multipleDestSpec>;
    destinationCriteria = 3;
    // specifies that the destination plot is the one on which the age of
    // herbage growth cycle expressed in degree days is the oldest
    criteria = 6;
         // specifies that the activity depends on a threshold of age of growth
         // cycle (expressed in degree days) of the destination plot and
         // beforehand on the impossibility to last one more day at grazing on
         // the current plot
    comingHerbageRegrowthDurationThreshold = 700.;; …
```

Figure 17 : Declaration of instances of the SEDIVER class *movingHerdBatchSequence* for the traditional (upper frame) and alternative (lower frame) management modes. The declaration is commented on in the text in the lines preceded by « // ». « +I movingHerdBatchSequence movingSequence_HB1SlopeSpring » means add to the activity plan an instance of class *MovingHerdBatchSequence* named *movingSequence_HB1SlopeSpring*. « +E » means add an element to the upper level activity just declared.

there they are mated. The cows are gradually moved up to summer montane pastures for grazing. A contract with the herdsman stipulates the duration of the stay on these pastures, i.e. from the 1st of June till the 1st of October. In the meantime, the heifer herd batch remains on the slopes from spring until the end of October. If there is a shortage of grazing during summer, grazing stops and the animals are fed with conserved forage, generally hay, until there is enough herbage for grazing again. Farmers also begin to harvest pastures for conservation, with 4.5 ha of valley-bottom plots harvested twice when possible, first at the beginning of June for baled silage and possibly again during August for hay. Another 7.5 ha grazed in early spring is harvested once around the end of June for making hay. Calves are sold at around 200 kg from summer montane pastures from the beginning of September. During October, the two herd batches successively graze plots towards the valley bottom. To avoid early snowfalls, they always reach the valley bottom before mid-November. They graze the valley-bottom plots until weather conditions force them to move indoors until next spring. In such systems, the traditional management form relies on calendar benchmarks and herbage availability expressed as herbage height at the entrance of a plot to be grazed or in residual herbage height after grazing of a plot such as in Parsons (1988) (Fig. 17). This management form is based on the farmer's experience and results in quite a stable system configuration and management patterns despite year-to-year weather variation.

3.3.4.1.4. An alternative form of management

We believe that to improve the herbage utilization rate, further attention should be paid to the herbage dynamics on each field and thus to exploiting the within-farm diversity of grassland production patterns through their timing, productivity and nutritive value. Indeed, the trade-off between herbage growth and senescence, which depends on leaf life span and phenological stages of grassland plant species (Duru et al., 2009a), has major consequences for herbage availability and nutritive value. For example, Coléno et al. (2005) have pointed out that both the first and second harvests occur too late in the season in such systems. In both cases, at the time of harvest, herbage senescence has already overtaken growth for several days and this results in less harvested herbage with a lower nutritive value. In addition, for the first harvest, preceded by spring grazing, this grazing generally occurs during the reproductive phase of the grassland. During that phase, daily growth is about twice as fast as in the non-reproductive phase (Duru et al., 2009a). Thus, by removing the apex of grass species and therefore preventing the reproductive phase, this grazing reduces the herbage yield at the subsequent harvest.

Increasing herbage utilization rate calls for increased attention to plant and grassland diversity and their consequences for herbage dynamics in configuring and managing the system. Relying on herbage dynamics implies a flexible configuration and situated

management dictated by weather conditions and the current system state. Consequently, herd batch destinations at grazing are not normally determined in advance but are chosen from a list according to the herbage dynamics on each plot (Fig. 17). Herd batch movements are not determined according to dates and herbage heights but according to leaf life spans and phenological stages. The first harvests are guided by phenological stages whereas the next are determined according to leaf life spans. Leaf life spans, expressed in degree-days, are useful insofar as they can indicate whether senescence might overtake growth or growth rate might fall below a threshold. Phenological stages, also expressed in degree-days, characterize the pasture's transition into the reproductive phase, and indicate when to stop grazing so as not to interfere with this reproductive phase.

3.3.4.1.5. Simulations

The model was run for each form of management, i.e. traditional and alternative, for 7 real year-long weather series (1998-2004) taken individually from the weather station located at Ercé (altitude 670 m.a.s.l.; latitude: 42°50N; longitude: 1°17E). Years 2001 and 2003 and to a lesser extent year 2004 were characterized by a lasting plant water stress during summer whereas the other studied years can be considered close to the average annual weather pattern assumed in the typical case. Simulations started when the cattle entered the stable and ended when they returned about one year later. Based on the data observed, the starting date for simulations was fixed on the 28th of November. This was because measured data usable as simulation inputs were not available for the whole system on a single survey day. The winter period compensated for over- or underestimates of system descriptor values, such as available herbage on each plot which is depleted by the absence of growth and the maintenance of senescence during winter. Therefore, beginning the simulations in that way initialized the system state and provided reliable outputs for the upcoming season. The structure of the simulated system was kept constant between simulations, as was the initial system state.

3.3.4.1.6. Evaluation of the simulations

Evaluating the simulated behavior of a system over its entire validity domain on the time and spatial scales of this project is hardly possible. Measurements on real cases, in particular for biophysical aspects, are always incomplete. Biophysical submodels taken from the literature were all evaluated independently against comparable conditions to those of the present study (e.g. Jouven et al., 2008; Duru et al., 2009a), i.e. similar soil and weather conditions, similar animal production, etc. The simulated behavior of these submodels and the manager's decisions and actions integrated into a larger model has been evaluated and will not be further addressed here. The second step in evaluating a farm-scale model like SEDIVER is mostly of checking that the outputs are consistent for a range of simulation

inputs. It consists of verifying the whole system behavior through a range of aggregated output indicators, e.g. the quantity of food stocks harvested per animal unit, the quantity of food stocks consumed per animal unit, the proportion of grazing in the animals' diet, etc. Most of these aggregated indicators are available in the typical case (Institut de l'Elevage, 2006) for a typical annual weather pattern with moderate plant water stress. It can be compared (Tab. 2) with simulation outputs for years with moderate plant water stress (1998, 1999, 2000, 2002).

Tableau 2 : Average values for system performance aggregated indicators from the typical case (Institut de l'Elevage, 2006) and from simulation outputs for years with moderate plant water stress (1998, 1999, 2000, 2002) and with lasting plant water stress (2001, 2003, 2004).

		Years with moderate plant water stress		Years with lasting plant water stress	
Output indicator	Typical case	Trad	Innov	Trad	Innov
Harvested Quantity (tons)	53	45	93	26	40
Harvested Quantity/AU (tons)	1.83	1.56	3.19	0.90	1.37
Digestibility Of Harvest ($kg.kg^{-1}$)		0.61	0.68	0.61	0.65
Stock Consumption (tons)	53	53	49	53	52
Stock Consumption/AU (tons)	1.82	1.81	1.69	1.82	1.80
Grazing in Feeding (%)	63	59	61	57	57
Digestibility Of Grazing ($kg.kg^{-1}$)		0.71	0.75	0.74	0.76
Herbage Utilization Rate (%)		55	70	51	61
Live Weight Production (kg)	6350	5791	5884	5314	5135
Live Weight Production/AU (kg)	219	200	203	183	177

3.3.4.2. Simulation results

3.3.4.2.1. Ability of the model to simulate the actual system behavior

The simulated harvested quantity tended to be underestimated by 15% compared with the typical case (Tab. 2). The first harvests for bale-silage making yielded on average 4.7 $tons.ha^{-1}$ in the simulations against 4.2 $tons.ha^{-1}$ in the typical case. But later harvests, i.e. the first harvests on the valley-bottom plots grazed in early spring and the second harvests on the plots already cut once, showed lower simulated yields when compared with the typical case, with 2.3 $tons.ha^{-1}$ against 3.0 $tons.ha^{-1}$ and 2.2 $tons.ha^{-1}$ against 2.5 $tons.ha^{-1}$ respectively. Simulated stock consumption was very close to that of the typical case. The distribution between types of food was also quite well simulated, with 19.5 tons of bale silage consumed per year, as in the typical case, and 35.5 tons of hay consumed per year against 33.5 tons in the typical case. The simulated duration of the grazing period corresponded to the expectations and led to a simulated proportion of grazing in animal feeding underestimated by 4%. Simulated live weight production was underestimated by 9% compared to the typical case with 200 kg per animal unit per year against 219 kg per animal unit per year. At the age

of 120 days, simulated calf live weight was on average 159 kg, close to the 155 kg for the standards of the Gasconne breed (Sersia France, 2009). However later in the season, daily live weight gain progressively decreased to a greater extent in the simulations compared to the breed standards. Indeed, at the age of 210 days, if calves had not been sold, their simulated weight was around 205 kg against 245 kg for the breed standards.

3.3.4.2.2. Comparison of traditional and alternative management forms

Harvested quantities with the alternative management form were significantly higher ($P < 0.022$) than with the traditional form (Tab. 2; Fig. 18). The amount harvested increased twofold for years with a moderate plant water stress and 1.5-fold for years with a long stress. This was because with the alternative management form, harvests occurred before yield depletion due to the increase in herbage senescence. As a consequence, in years with a moderate plant water stress, three harvests were taken on all the valley bottom plots, one between stem elongation and flowering of herbage plants, and one just after one leaf life span for the two subsequent cuts. This more frequent grassland use resulted in greener standing herbage, so that digestibility of the harvest was also significantly enhanced ($P < 0.004$) by .07 $kg.kg^{-1}$ and .04 $kg.kg^{-1}$ according to the type of season. Since the initial system state was kept constant between simulations, including digestibility of the food stocks, the benefits of this improvement to animal feeding and production for the subsequent winter were not evaluated. Stock consumption remained in a similar range for both management modes and both types of annual weather pattern. Still, the proportion of grazed herbage in the animals' diet increased by 2% in the years with moderate plant water stress. Due to the increased frequency of grassland use with the alternative management form, digestibility of grazed herbage was significantly enhanced ($P < 0.019$), in particular during autumn grazing in favorable years. Indeed, the third harvest at the end of summer in the valley bottom ensured grazable herbage in autumn at about the age of one leaf life span. Given that the alternative management form stuck to herbage production, herbage utilization rate significantly improved ($P < 0.012$) by 15% in favorable years, and by 10 % in years with a long plant water stress. Animal production performance was maintained with the alternative management form in both favorable and unfavorable seasons.

Although the benefits of the alternative management form were more pronounced in favorable years, it still outperformed the traditional form in years with prolonged plant water stress. Simulations revealed that each time a double harvest was possible (i.e. with enough harvestable yield) with the traditional management form on the valley-bottom plots, a triple harvest was possible with the alternative management form. In unfavorable years, because the harvest occurred before senescence-related yield and digestibility losses, harvested quantity and digestibility remained higher with the alternative management form.

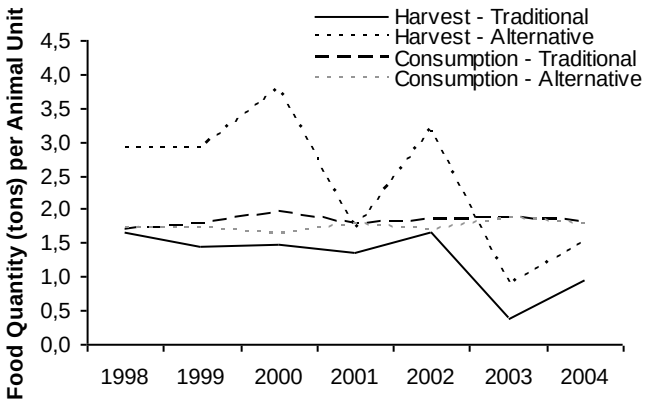


Figure 18 : Quantities of food stocks harvested and consumed by the herd with the traditional and alternative management modes for the seven simulated years.

Providing food supplements during drought to substitute for grazing lasted as long with the traditional management form as with the alternative management form. These observations suggest that the alternative management form coped better in unfavorable years. It also performed that much better in favorable years that it would compensate for food stock shortages in an unfavorable year and thus contribute to secure forage self-sufficiency.

3.3.5. Discussion and Conclusions

3.3.5.1. On the evaluation of the simulation-based application

Evaluation is particularly difficult with dynamic farm-scale simulation models such as SEDIVER. Such models are expected to provide realistic chronologies and estimates of system state descriptors over several years. The extent of variation of uncontrollable factors such as weather and the farmer's management behavior is large and precludes any systematic exploration or sensitivity analysis. The simulation results were therefore presented to two farmers involved in the survey and the expert coordinating it. All three found the simulated schedule of activities and production consistent and realistic. More importantly, they validated the practical feasibility of the alternative management form based on literature data and expert knowledge and evaluated by simulation. All these facts suggest that encouraging farmers to pay increased attention to plant and grassland diversity and its consequences on herbage dynamics in their management would offer them promising possibilities for coping with weather variability and to secure forage self-sufficiency. This can be made possible by a set of methods recently developed to simplify functional characterization of plant communities (Fallour-Rubio et al., 2008) and monitoring of herbage dynamics using thermal time (Ansquer et al., 2009a). Long-term simulations might have revealed the benefits of this management form through its between-year

cumulated benefits both on forage self-sufficiency and on nutritive value of grazed and harvested herbage with subsequent improvement of animal performance.

The simulations tended to underestimate harvested quantity and live weight production when comparing the traditional management form with the typical case. The biophysical model used to simulate available herbage dry matter is very sensitive to plant mineral and water nutrition indices (Duru et al., 2009a). Simulation inputs required for updating these indices were not available in the typical case and were deducted from the farm survey. A small discrepancy between the values used as inputs and those implicitly assumed in the typical case might have led to such underestimations. Simulated dynamics of cows' and heifers' live weight were realistic with a range of variation over the year close to the expectations. Calves' live weight was simulated fairly well at the age of 120 days but was underestimated in the last month before sale. Validating their model, Jouven et al. (2008) mentioned such a slight underestimation of simulated calves' live weight in the last month before sale. Another reason relates to the feeding of concentrates. In the typical case, it is assumed that concentrates are fed on such farms. In the four farms surveyed, no farmers fed them and livestock feeding was fully grassland-based. Given this lack of real examples, we assumed no concentrates were given, which may have led to lower simulated milk production and lower simulated calf live weight gain.

3.3.5.2. On the modeling approach

As already suggested by van Keulen (2006), farms, especially in less-favored areas, are characterized by a strong heterogeneity in resource use, resulting in much variability of production in time and space. Common farm-scale modeling approaches which are typically based on linear programming models (e.g. ten Berge et al., 2000; Pacini et al., 2004) rely on farm-averaged indicators such as stocking rate or amount of fertilizer per hectare, and ignore this variation. The SEDIVER simulation model explicitly integrates within-farm diversity in plant, grassland, animal, and farmland and its consequences for the dynamic heterogeneity of biophysical processes between entities. Previously published dynamic farm-scale simulation models integrated some of these types of diversity (grassland and farmland diversity in Andrieu et al., 2007b; grassland and animal diversity in Jouven and Baumont, 2008) but none included all four types in a single versatile model. This has fundamental consequences for the realism of the simulations. Indeed, the induced dynamic heterogeneity of biophysical processes within a farm, in particular herbage dynamics, has strong practical implications in the planning and coordination of activities by the farmer. It generates constraints, e.g. losses of herbage quantity and nutritive value due to excessive delays before exploiting the plots, and opportunities, e.g. a spread of herbage production peaks on the plots successively grazed, on herbage use and animal feeding, which have major

consequences for system performance.

Simulation models have traditionally focused on the agronomic and technological aspects of the production processes, e.g. crop or animal responses to farming operations (e.g. Stöckle et al., 2003). When a farmer's decisions are to be simulated, this is usually done by implementing a sequence of technical actions on dates fixed as simulation inputs or according to weather conditions. Managing an agricultural production process is a dynamic process in which plan revision and execution must be interleaved, because both the production system state and the external environment keep changing. Failure to account for these essential aspects of farm management greatly affects the predictive power of the farm-scale simulation models that oversimplify the system by seeing it as a set of biophysical processes that can be controlled independently of one another, with limitless resources (labor, machinery) and instantaneous operations. As a consequence, most models suffer from unrealistic assumptions about the importance of the spatial, temporal and resource restriction aspects of agricultural production management. The SEDIVER project is the result of consistent efforts to improve this representation and get closer to the questions raised in practice. Indeed, through flexible activity plans and conditional adjustments, it integrates how the farmer copes with unpredictable and uncontrollable factors, and yields different sequences of actions for different herd batches or for each plot to be harvested, depending on the course of conditions and events encountered. It explicitly considers the management constraints faced by a farmer, those inherent to the farm structure e.g. suitability for mechanization of the plots, and those encountered dynamically e.g. time dependencies between activities. Finally, most dynamic simulation models assume perfectly rational management behavior based on decision rules such as movement of a herd batch at grazing when reaching a residual herbage height threshold. In practice and as implemented in the SEDIVER model, management is far less ideal and systematic, and is rather based on a range than on optimum absolute thresholds (Kemp and Michalk, 2007). In this sense, the SEDIVER model fulfils the wish of Keating and McCown (2001) to achieve « relevance to real world decision making and management practice » in farming system models.

The Object Modeling Technique and the ontology supporting the DIESE framework are another key model feature. Both facilitated a modular development of the model and contributed to re-usability and exchangeability of the code. They provided the concepts and templates to encapsulate relevant pieces of knowledge into particular pieces of code. For instance, biophysical processes were broken down into a set of functions implemented in separate methods. In addition, the ontology provided the common structure to help organize management activities into flexible plans. Compared to the decision rules approach which becomes cumbersome as the number of rules grows beyond a limit, this structure greatly eased the design and implementation of complex activity plans including conditional

adjustments. It also proved very useful in the interactions with farmers. Despite the abstract nature of the representation, it constituted an intelligible support to discuss the activity plans designed using schemes such as a friendlier version of Figure 16.

So far, the SEDIVER model has been used to design grassland-based beef systems with similar farm structure but with management strategies leading to a more efficient exploitation of biophysical processes such as herbage production. In this context, expert knowledge is available to determine the design objectives, the pathways to reach these objectives that have to be evaluated by simulation, and to evaluate the consistency, realism and practical feasibility of the designed systems (Meynard, 2008). As long as longer-term issues such as climate change are at stake, the modifications to be evaluated will involve more profound changes. Expert knowledge can hardly be considered as relevant as in the first case, in particular because knowledge about the consequences of such changes is not available. Simulation models such as SEDIVER offer promising opportunities to evaluate these consequences, possible solutions and to learn about these together with researchers, experts and farmers.

Acknowledgements

This study was partly funded by the French ANR ADD program, in the framework of the project TRANS (TRANSformations de l'élevage et dynamiques des espaces, ANR-05-PADD-003) and by the French ANR VMC program, in the framework of the project VALIDATE (Vulnerability Assessment of LIvestock and grasslanDs to climAte change and exTreme Events, ANR-07-VULN-011). We thank J.P. Theau and O. Therond who, as specialists of livestock farming systems, contributed to this research, and Alan Scaife for the English revision.

4. Flexibilité sur l'utilisation des parcelles en herbe

4.1. Introduction

Le Chapitre 3 a décrit le développement du modèle de simulation SEDIVER. L'objectif assigné à ce modèle de simulation est de faciliter l'analyse de systèmes fourragers herbagers et la conception réglée de systèmes fourragers flexibles, valorisant la diversité fonctionnelle végétale et animale, et du territoire d'exploitation. Comme indiqué dans le Chapitre 2, la modification de l'utilisation de ces composants biologiques est fonction de contraintes topographiques, topologiques, et liées à la plasticité ou résilience de ces composants biologiques. Pour faciliter la conception réglée de systèmes fourragers flexibles, il nous a donc semblé nécessaire d'approfondir la notion de flexibilité appliquée à l'utilisation des parcelles en herbe. Se sont alors posées les questions suivantes :

Quelle est la flexibilité potentiellement exploitable par l'éleveur pour l'utilisation des parcelles en herbe ? Comment la caractériser dans l'espace et dans le temps ? Quels enseignements tirer de cette caractérisation pour la conception réglée de systèmes fourragers flexibles ?

La Section 4.2., qui répond à ces questions, est un article publié dans *Agronomy for Sustainable Development* (n°29, pp. 381-389). Cet article suggère l'existence de deux types de flexibilité pour l'utilisation des parcelles en herbe, la flexibilité organisationnelle et la flexibilité temporelle. La première se réfère à la gamme des types d'utilisation (e.g. pâturage d'animaux en production vs. pâturage d'animaux pour le renouvellement vs. fauche) possibles sur une parcelle en herbe. La seconde est liée à la fenêtre temporelle qui, pour chaque type d'utilisation, garantit le renouvellement de la production fourragère et le maintien d'un équilibre dynamique interspécifique dans la communauté végétale. Se sont alors posées les questions suivantes :

Quelles sont les conséquences des différents types d'utilisation sur la composition fonctionnelle des communautés végétales ? Quelles différences de composition fonctionnelle existent entre des types de communautés végétales définis selon des types d'utilisation ? Ces différences induisent-elles une hétérogénéité simulée des processus biologiques entre communautés végétales qui dépasse les incertitudes sur les modèles de simulation ?

La Section 4.3. qui est un article publié dans *Agriculture, Ecosystems & Environment* (n°129, pp. 508-515) apporte des réponses à ces questions.

4.2. Characterizing potential flexibility in grassland use. Application to the French Aubrac area

G. Martin[1,3*], L.Hossard[1], J.P. Theau[1], O. Therond[1], E. Josien[2], P. Cruz[1], J.P. Rellier[3], R. Martin-Clouaire[3], M. Duru[1]

[1] : INRA, UMR 1248 AGIR, 31326 Castanet Tolosan, France

[2] : CEMAGREF, UMR Métafort, 63172 Aubière, France

[3]: INRA, UR 875 BIA, 31326 Castanet Tolosan, France

[*]: Corresponding author at: INRA, UMR 1248 AGIR, F-31326 Castanet Tolosan, France. Tel.: +33 5 61 28 54 75; fax: +33 5 61 73 55 37. E-mail address: guillaume.martin@toulouse.inra.fr (G. Martin).

(Accepted 4 November 2008)

Abstract

Farmers increasingly need to adjust their management practices to accommodate unexpected events such as drought, and preserve the sustainability of their production. This flexibility requires background knowledge about where and when freedom of choice can be exercised. Here, we designed an analysis framework for grassland-based farming systems in mountainous and less-favored areas. An expert-based discrimination tree characterizes organizational flexibility by determining the range of possible types of grassland use under various topographic and farming constraints such as suitability for mechanization, and ease of access to a field. A set of time windows evaluates the timing flexibility in grassland use, each associated with a combination of a grassland community type and a type of grassland use. Our results show that the outputs of the discrimination tree match for 139 of 165 grassland fields, by comparison with field data obtained in the French Aubrac region. For a particular type of grassland use, the set of time windows proves that timing flexibility in grassland use between grassland community types can increase by 15 days over a 37-day time range. When applying the two components of the analysis framework to a farm case, it shows that 24% of the farm area offers organizational flexibility, with several possibilities for grassland use. Timing flexibility for bringing forward or delaying the use of the grassland fields is unused in the farm. Most of the dates of grassland first use are similar irrespective of the diversity of grassland communities. The application of the analysis framework offers a sound evaluation of the potential flexibility to establish where and when it is possible to adjust management practices to cope with unexpected events. It can also be helpful in setting up coherent alternatives to the observed management strategies that can then be expanded in dynamic simulation models enabling deeper analysis.

Keywords:

mountainous areas / grassland use / organizational flexibility / timing flexibility / analysis framework

4.2.1. Introduction

4.2.1.1. Rationale

In mountainous or less-favored areas, farming systems are generally based on a diversity of permanent grasslands (Maurer et al., 2006; Andrieu et al., 2007a). Grass production is highly variable in space and time, partly because of the variation in topography, grassland use and grassland community characteristics, and partly because of weather variability within and between years (Parsons, 1988; Maurer et al., 2006). Farmers have to manage the feeding of the herd in compliance with desired and attainable grass production. Configuring a farming system, i.e. allocating land areas over time to particular uses, and organizing production activities across time and space, is thus a complex task. This complexity is increasing due to the growing uncertainty surrounding livestock production, in particular due to climate change (Steinfeld et al., 2006). Climate change requires greater adaptive capacity of farmers in order to anticipate potential damage, to take advantage of opportunities, or to cope with the consequences. In particular, farmers have to adjust their management practices to actual conditions within the grazing season to achieve their objectives and preserve the longevity of their production project (Parsons, 1988; Ingrand et al., 2007; Kemp and Michalk, 2007). A shift towards greater flexibility (Dedieu et al., 2008a) generates challenges for management in order to make it a means for accommodating unexpected or new events, e.g. drought or new agri-environmental schemes, and for creating opportunities for innovation in farm practices and improving the efficiency of the production system. The primary challenge posed by exploitation of flexibility is having the background knowledge about where and when freedom of choice can be exercised.

Flexibility in farming systems is gaining increasing importance in simulation-based approaches to farming system design (e.g. McCown et al., 1996). To evaluate the performance of management practices by simulation, one has first to articulate them in a management strategy scenario prior to the simulation. Integrating flexibility into a management strategy scenario to be evaluated by simulation requires a sound body of knowledge about the sources of flexibility in the farming systems, which should then support decisions about what to change, where and when. The sources of flexibility are of a very different nature (Ingrand et al., 2007; Dedieu et al., 2008a): technical and organizational, e.g. the control of animal breeding; structural, e.g. the choice of a herd size and a stocking rate; and financial, e.g. the recourse to external revenue, etc. We focus on the technical and

organizational flexibility related to grassland use.

4.2.1.2. Sources of flexibility in grassland use

Most research dealing with the management of forage shortages in grassland-based livestock systems consider the stocking rate as the key issue (e.g. Tichit et al., 2007). However, in less-favored areas, as emphasized by Caballero (2007), stocking rate is less of a problem than the spatio-temporal distribution of grazing. Farmers' willingness to modify grassland use on a given field to cope with unexpected or new events can be strongly constrained by the flexibility in grassland use in time and space on that field, which depends on planning on the farm scale. We focus on organizational flexibility and timing flexibility in grassland use, i.e. the spatial and the temporal dimensions of flexibility in grassland use.

Organizational flexibility determines the range of possible types of grassland use on a field. It is associated with various topographic and farming constraints. Distance from the field to the farmstead and between fields, field accessibility, size, presence of hedgerows, soil hydromorphy and slope, i.e. suitability for mechanization, have been identified among the determinants of land use in the French Plateau of Lorrain (Le Ber and Benoît, 1998), in the Netherlands (Carsjens and van der Knaap, 2002), in French Brittany (Thenail and Baudry, 2004) and in French Auvergne (Andrieu et al., 2007a).

Timing flexibility in grassland use is the extent to which the use of a given grassland may be brought forward or deferred for a temporal interval at various times of year. It can be represented through a « time window » for grassland use. There is an optimal time window for using grassland of a given community type, i.e. the structure and composition of a plant community, depending on its biomass availability and/or digestibility and herd feeding objectives (Dale et al., 2008). This time window has to be compatible with the creation or renewal of particular grassland community characteristics (Kemp and Michalk, 2007). With stable plant mineral nutrition, using the grass for grazing or cutting within this time window should ensure sustainable long-term production by keeping the grassland in a dynamic equilibrium (Huston, 1994). Timing flexibility in grassland use varies between grassland community types (Duru et al., 2008b), which are mainly determined by management, e.g. nutrient resource availability and grassland use (Lavorel and Garnier, 2002) and, to a lesser extent, by other factors such as the type of grazing animals (Bakker et al., 2006). We focus on the relations between type of grazing animals, type of grassland use and timing flexibility in grassland use together with grassland community characteristics. These characteristics in turn influence choices for type and timing of grassland use.

4.2.1.3. Originality and objectives of the article

The question of organizing grassland-based livestock systems under a range of spatio-temporal constraints has received little attention. Even in the field of cropping system planning, approaches are either focused on spatial constraints (e.g. Le Ber and Benoit, 1998) or temporal constraints (e.g. Dogliotti et al., 2003) but never both at once. Applied to grassland-based livestock systems in mountainous or less-favored areas, the few published findings analyze the observed grassland use on the farm scale either from a topographic and farming constraints angle (Brunschwig et al., 2006) or from the point of view of grassland community characteristics (Duru et al., 2005). As far as we know, no articles consider, in analyzing grassland use planning, the two sources of flexibility, i.e. organizational flexibility and timing flexibility in grassland use. These concerns are at the core of the analysis framework presented in this article. Unlike Groot et al. (2007), our aim is not to find the optimal land use systems that satisfy a range of objectives, but to provide practical information for characterizing the farmer's scope for adapting the grassland system to particular conditions occurring during spring. This is of major interest for researchers involved in the design of innovative farming systems, providing them with guidelines to design reliable and feasible alternatives to the observed management strategies prior to their evaluation by simulation.

In this article, we describe the design and application of the analysis framework for mountainous or less-favored areas. It is made up of two components: (i) an expert-based, as opposed to data-and-statistics-based, discrimination tree of possible types of grassland use under certain topographic and farming constraints to evaluate organizational flexibility, and (ii) a set of time windows to evaluate timing flexibility in grassland use, each associated with a combination of a grassland community type and a type of grassland use. The analysis framework is applied to data collected in eight farms of the French Aubrac region. In the last section, a focus on one of these farms emphasizes the emerging knowledge brought by the concomitant analysis of organizational flexibility and timing flexibility in grassland use.

4.2.2. Materials and Methods

4.2.2.1. Design of the analysis framework

Characterization of organizational flexibility in grassland use was an iterative process involving six scientists and three experts, all co-authors, for several successive meetings. Based on the existing literature on the topic (Le Ber and Benoît, 1998; Carsjens and van der Knaap, 2002; Thenail and Baudry, 2004; Andrieu et al., 2007a) and the empirical knowledge of the research team, we listed the topographic and farming constraints involved in the

allocation of a type of grassland use in mountainous or less-favored areas. We ended up with a number of Boolean conditions linked to functional indicators and generic and meaningful characteristics. As an example, an altitude threshold for characterizing so-called summer grasslands was replaced by the capacity of a field to supply green fodder during summer; this attribute is actually directly linked to the specific use of those fields, unlike an altitude threshold. Then, also based on expert knowledge, we established a hypothetical hierarchy between these characteristics to account for their degree of importance for farmers when allocating a type of grassland use to a field. Those combinations of characteristics that did not make sense were removed from the discrimination tree. Finally, we synthesized and ordered this knowledge by arranging the characteristics in a discrimination tree of possible types of grassland use, i.e. one or more, depending on the level of organizational flexibility. The relevance and scope of the empirical agronomic knowledge synthesized in the tree was further evaluated by comparison with observed data (see Sect. 4.2.3.1.).

For grazing, type of grassland use was expressed by the type of grazing animals. Grazing animals were categorized as follows. Animals for production included milking cows in dairy systems, and heifers, steer calves and suckler calves if sold young, i.e. 9 months, in beef systems. Animals for replacement or out of their production period which require less care and attention were heifers and dry cows in dairy systems, and suckler cows if calves are not sold young, i.e. 9 months, in beef systems.

Recent advances in production and functional plant ecology have made it possible to characterize timing flexibility in grassland use. The concept of functional diversity is based on the definition and measuring of plant traits, i.e. morphological, physiological and phenological plant characteristics, in response to availability of resources and perturbations (Diaz and Cabido, 2001). According to Grime's biomass ratio hypothesis (Grime, 1998), taking into account only the most dominant species of a plant community would be sufficient to describe response to environmental change. Grasses usually represent a large proportion of the biomass in species-rich grasslands. In addition, it has been shown that legumes and forbs mimic the dynamics of grass species within a plant community (Duru et al., 2009b). The leaf dry matter content of individual species as well as abundance-weighted mean leaf dry matter content across grass species are well correlated with agronomic characteristics such as organic matter digestibility and plant phenology that govern the dynamics of grass growth (Duru et al., 2005; Al Haj Khaled et al., 2006; Da Pontes et al., 2007). Leaf dry matter content measurements rank species in the same order regardless of the frequency of defoliation (Da Pontes et al., 2007) and nutrient availability (Al Haj Khaled et al., 2005), and across years and sites (Garnier et al., 2001). Given all these features, an abundance-weighted mean leaf dry matter content across grass species provides a powerful descriptor of a grassland community for characterizing the timing flexibility through the

time windows for grassland use (Duru et al., 2008b).

When comparing technical operations between fields and farms in semi-mountainous areas, a major problem is the time scale. Fields are at various altitudes, so that at a given Julian date, herbage age and phenology will vary. To account for this variation, time is expressed as thermal time or growing degree-day sums, i.e. the accumulated daily mean temperature between 0°C and 18°C starting from the 1st of February. Air temperatures are assumed to fall by 0.6°C per 100 m compared with the reference daily mean temperature measured at a fixed altitude (Cros et al., 2003).

The use of an abundance-weighted mean leaf dry matter content across grass species combined with thermal time offered a basis for comparing the observed thermal time at first use on the surveyed grasslands for a range of grassland community types. For a given region, observations over a wide range of grasslands provided a reliable picture of the diversity of thermal time at first use for the average climatic year associated with each observed combination of grassland use and community type. The earliest date for grassland first use marked the beginning of the thermal time window, while the latest closed this window.

4.2.2.2. Application to the Aubrac region

4.2.2.2.1. Case study

The work was carried out in the Aubrac region in the southern part of the French Central Massif (2.85°E, 44.68°N). It covers an area of about 40 km × 20 km with an altitude range of 800–1400 m. The climate is montane with long winters characterized by heavy snowfalls that determine turnout and wintering dates. Average yearly temperature is 9°C. Average yearly precipitation, i.e. 1312 mm, is well distributed, with 107 rainy days per year. Most of the area is occupied by temporary and permanent grasslands with dairy and beef livestock.

In choosing the sample farms, we did not attempt to choose farms which were particularly representative of the zone by using statistical methods. Instead, we tried to capture the diversity of management of the local farming systems by choosing farms located on a gradient of intensification depending on farmers' use of mineral fertilizers, grazing methods and haymaking practice, i.e. herbage phenological stage and overall stocking rate for subsequent diversity in field management intensity. Silage is not made in the zone, due to Protected Designation of Origin specification. The farms also had to be similar in their availability of machinery and labor per animal unit. As the survey involved arduous field work, we restricted our analysis to four beef farms and four dairy farms (Tab. 3), selected with the assistance of local extension services. To simplify the analysis, we surveyed a range of quite standardized farms as regards animal production, i.e. farms with similar animal

breeds and similar animal categories with comparable feeding requirements. Thus, in our analysis we do not consider differences in herd feeding objectives that could affect the determination of the thermal time windows for grassland first use.

Tableau 3 : Main characteristics of the four dairy farms and four beef farms surveyed. Stocking rate at turnout was calculated based on the available area close to the cowshed at turnout. Structural descriptors such as area, number of cows, size of the herd and altitude range of the farm fields differ between farms. In addition, farms are located on a gradient of intensification of stocking rate, confirming the diversity of management of the surveyed farms.

Farm	Bat	Dag	Pou	Sal	Dar	Del	Mou	Nie
Production	Dairy	Dairy	Dairy	Dairy	Beef	Beef	Beef	Beef
Area (ha)	54	58	76	69	105	74	116	191
Summer pastures (ha)	0	15	18	28	38	0	63	106
Altitude range of the farm fields (m)	900-1100	900-1100	900-1300	900-1300	900-1300	800-1000	800-1300	1000-1400
Number of cows	40	38	48	35	56	44	48	64
Number of animal units	60	56	69	52	134	104	111	144
Stocking rate (ha/animal units)	0.90	1.04	1.10	1.33	0.78	0.71	1.05	1.33
Stocking rate at turnout (ha/ animal units)	0.61	0.51	0.50	0.33	0.36	0.61	0.31	0.43
Number of fields in the farm	25	27	26	31	35	38	22	27
Number of fields considered in the study	17	22	16	21	26	25	18	20
Proportion of surface area considered in the study (%)	78	69	57	87	84	88	93	88

4.2.2.2.2. Characterization of grassland use and of the topographic and farming constraints

The first stage of the survey was to record topographic and farming information for each field, i.e. area, altitude, distance to the cowshed and ease of access for a herd batch coming from the cowshed or the neighboring field, and suitability for mechanization. Next we identified the farmer's past and present grassland use practices on the fields concerned: fertilizer applied, type and date of the first use in spring for the average climatic year, type of grazing animals. These records enabled us to exclude those grasslands that were not considered at equilibrium (sensu Huston, 1994), i.e. abandoned or irregularly used, for the subsequent steps of data collection.

4.2.2.2.3. Characterization of grassland community types

A floristic survey using the frequency–rank method was conducted over the 165 fields of the eight surveyed farms. The survey was used to estimate an abundance-weighted mean leaf dry matter content across grass species (LDMCg) for each sampled grassland field, based solely on the grass species' leaf dry matter content values, as $LDMC_g = \sum_i p_i.LDMC_i$ where pi is the relative abundance of the ith grass species and LDMCi is the leaf dry matter content of the ith grass species determined from a leaf dry matter content database (Al Haj Khaled et al., 2005). A Shapiro Wilk test on the data did not reject the null hypothesis (P = 0.605) that the data are normally distributed. Given the normal distribution of the data and the range of standard deviations in leaf dry matter content generally found in the literature (e.g. Al Haj Khaled et al., 2005), we divided the axis of abundance-weighted mean leaf dry matter content across grass species into four classes of equal range, i.e. 201–215 $mg.g^{-1}$, 216–230 $mg.g^{-1}$, 231–245 $mg.g^{-1}$ and 246–260 $mg.g^{-1}$. The relevance of this classification was confirmed by an analysis of variance (P < 0.001) displaying a high inter-group variance (Mean Square = 17626; df = 3) and a low intra-group variance (Mean Square = 2619; df = 162).

4.2.3. Results and Discussion

4.2.3.1. Characterization of organizational flexibility in grassland use

The research team identified five topographic and farming constraints as the main determinants of the range of possible types of grassland use in mountainous or less-favored areas. These five constraints were mainly field properties and one condition associated with herd batching. Listed in an expert-based order of importance as to when to allocate a type of grassland use to a field, these five constraints are:

(1) Possibility of daily return to the cowshed, which is mainly determined by the presence of an obstacle between the grassland field and the cowshed, i.e. road, forest, etc. or a long distance. Fields suited to a daily return are first used at turnout for both dairy and beef systems. They are reserved for the categories of animals requiring the most care, e.g. a supply of concentrates and water, especially in dairy systems with cows that need to be milked twice a day.

(2) Ease of access of a field from the closest one is a key factor for determining the type of grassland use of fields on which daily return to the cowshed is not possible. If such a field does not permit the move to the closest field without transport then it is isolated and further elements, e.g. surface area per animal unit, should be considered to determine its type of grassland use.

(3) Suitability for mechanization; this determines whether the field can be mowed.

(4) Sufficient surface area to feed five animal units per hectare during three days in spring; this determines whether an isolated field can be used for grazing. Such fields require the herd batch to be transported. Thus, the grassland field should provide enough fodder to satisfy the needs of a five-animal-unit herd batch for at least three days before having to move on. Otherwise, isolated fields may hardly be used for grazing.

(5) The capacity of the field to supply green fodder during summer is of major importance in European semi-mountainous areas where the summer months are the driest. Hence, grasslands that are shallow or located at the highest altitudes are generally kept out of the grazing chain during early spring to preserve green standing herbage for late spring and summer.

Not all combinations of constraints were considered. For example, the possibility of moving to the closest field without transport does not make sense when daily return to the cowshed from the field is possible. Indeed, there would be other fields to which the herd could be moved in such conditions. Thus, the condition associated with a minimum three-day stay for a five-animal-unit herd batch also does not make sense if it is possible to move the herd batch easily.

The resulting discrimination tree (Fig. 19) identifies several types of grassland use in some cases, e.g. the CS1 constraint class, but a single one in other conditions when grassland use is much more constrained, e.g. CS2 constraint class. Types of grassland use were assumed to be dependent on the farm production, i.e. dairy or beef. In beef systems, fields are generally more scattered than in dairy systems, and lie at different altitudes. Thus, in beef systems, summer grasslands play a major role in the feeding system. At turnout, scarcity of land close to the cowshed results in a high grazing pressure in relation to the vegetation growth capacity (Tab. 3). The fields are lightly grazed for about one month before animals for replacement are moved to summer grasslands and stocking rates decrease around the farm to save fields of constraint class CS7 for the cutting operation following a light grazing. Thus, in beef systems, for grassland fields of constraint class CS7, light grazing followed by cutting is the only possibility (Fig. 19). Dairy systems generally have more fields near the cowshed, so that grazing pressure around the cowshed at turnout is slightly lower than for beef systems (Tab. 3), and other types of grassland use are possible as part of the area can be preserved for cutting from the beginning of the grazing season.

This discrimination tree identifies the proportions of multiple and single use grassland fields, the former being a source of organizational flexibility. To generate such a model, the decision to use an expert-based approach rather than a classification and regression

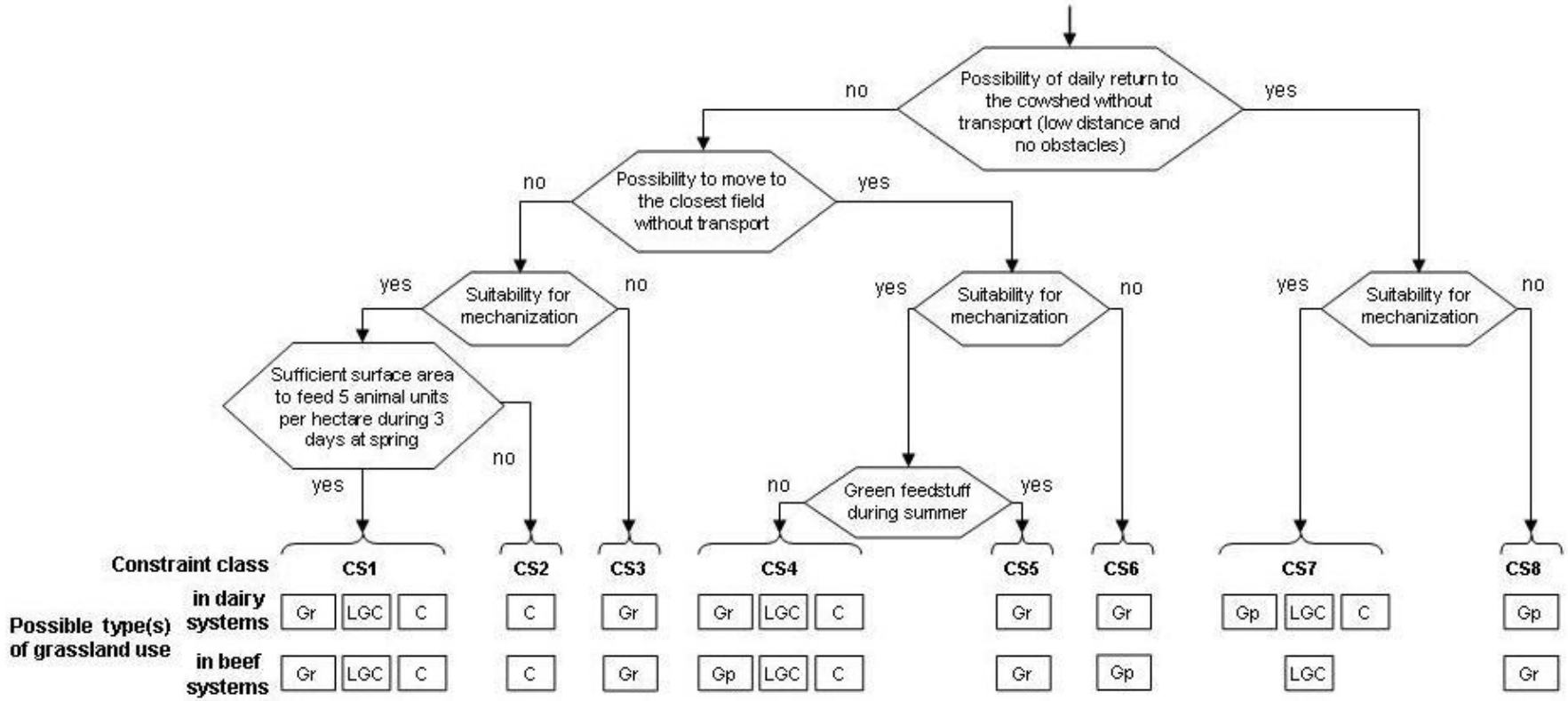


Figure 19 : An expert-based discrimination tree of grassland use opportunities according to the topographic and farming constraints of the field. Five topographic and farming constraints are listed in a hierarchical order and result in pathways of constraints named constraint classes (CS). Regarding the daily return to the cowshed without transport, obstacles can be roads, forests, etc. Those combinations of constraints that did not make sense were removed from the discrimination tree. For each constraint class a single or a range of possible grassland uses in spring is specified for dairy and beef systems. Types of grassland use are: Gp, grazing by animals for production; Gr, grazing by animals for replacement; LGC, light grazing followed by cutting; C, cutting. When compared with data gathered over 165 fields, the discrimination tree fits well with the observed type of grassland use for 139 fields. This discrimination tree gives the proportions of multiple and single grassland use fields, the former being a source of organizational flexibility.

approach was not trivial. The dataset was not exhaustive enough to ensure the generic nature of a tree generated with such classification and regression approaches. In addition, tree models generated with software programs implementing these approaches do not necessarily have a logical succession of criteria (Darnhofer et al., 1997 cited by Darnhofer et al., 2005). Manually drawn models can be more accurate (Darnhofer et al., 2005) as they are enriched by the experience of the persons involved in the design, thereby adding information gathered in various conditions over years not necessarily contained in a database. As an example (Fig. 19), the traditional view of considering suitability for mechanization as the main determinant of possible type of grassland use was thwarted when focusing on the configuration of the farming system and the organization of production activities. The possibility of daily return to the cowshed was found to be more critical in this case.

Tested on the data gathered for the 165 fields of the case study, the discrimination tree fitted well with the observed type of grassland use for 139 fields, or 85% of the total area of surveyed grassland fields. Several solutions were possible for certain pathways in the tree. Thus, proper statistical evaluation of the tree was not possible due to risks of overfitting. However, given the objectives associated with the discrimination tree, i.e. identifying the range of possible solutions rather than the most frequent one, such a test confirmed the relevance and scope of the empirical agronomic knowledge used to construct the tree, and the satisfactory performance obtained with the degree of complexity included in the tree, i.e. only five topographic and farming constraints, and seven constraint classes. The remaining 26 fields were spread over four beef and two dairy farms and were representative of exceptions, including, for instance, the case of a farm suffering from a shortage of area suitable for cutting, which forced hay-making on summer grasslands, or specific cases such as a field which is inaccessible until the neighboring field is cut.

A key factor in trying to grasp the diversity of farming practices lies in the reliability of the representation of local farmers' perception of their land resources. The experiences of scientists and experts involved in the research could have been strongly influenced by their long experience in southwestern and central France. This may limit the capacity of the expert-based discrimination tree to be easily and reliably applied to other European mountainous areas.

For simulation-based approaches to farming system design, there are no methodologies or models for planning feasible and suitable spatial organizations of grassland use. Such a tree could provide the means for choosing alternatives for further investigation by simulation of a system's robustness to unusual circumstances or weather events.

4.2.3.2. Characterization of timing flexibility in grassland use

For each type of grassland use we tested the use of thermal time at first use together with abundance-weighted mean leaf dry matter content across grass species for the 165 fields of the case study. The range of thermal time for grassland first use increased with the classes of abundance-weighted mean leaf dry matter content across grass species when the number of observations was sufficient, i.e. up to five (Tab. 4). Taking the example of light grazing before a cut, the range of thermal time for grassland first use changed from 221 °C.d^{-1} to 366 °C.d^{-1} when changing the grassland community type. In spring, this corresponds roughly to time windows of about 22 and 37 days. Similar to this example, when increasing the class of abundance-weighted mean leaf dry matter content across grass species, the range of thermal time for grassland first use, i.e. timing flexibility, increased from 551 °C.d^{-1} to 650 °C.d^{-1}, from 509 °C.d^{-1} to 617 °C.d^{-1} and from 281 °C.d^{-1} to 541 °C.d^{-1} depending on the type of grassland use (Tab. 4). For one case only, the expected widening in timing flexibility in grassland use was not observed, i.e. for fields with a grassland community belonging to class 4 of abundance-weighted mean leaf dry matter content for grass that were grazed by animals for replacement (last line in Tab. 4). Almost all these fields were summer grasslands located at the highest altitudes. On these summer grasslands, stocking rate was very low to compensate for lower temperatures that slowed vegetation growth, thereby delaying the time to reach particular phenological stages. This is why the results obtained in this case were not very different from those obtained with grazing by animals for replacement and class 3 of abundance-weighted mean leaf dry matter content across grass species.

This dependence between grassland community type and thermal time window for each type of grassland use has already been described in theory (Duru et al., 2008b). This is the first attempt to confirm it with observed farmers' practices. The validation of this hypothesis offers interesting prospects for classifying grassland use practices in the field of ecology. Currently, most published findings study the effect of one type of grassland use and classify it according to frequency of use (e.g. Da Pontes et al., 2007). Actually, plant traits respond not only to a single factor but to the occurrence of this factor within a time period. The approach combining thermal time at first use and abundance-weighted mean leaf dry matter content across grass species seems especially suited to characterizing this time range.

Considering that the sample grasslands were at equilibrium, using grassland within the thermal time windows might ensure the longevity of the grassland community over the long term. The limited number of grassland surveys means that these temporal reference points cannot safely be applied beyond our study area. Further surveys should be conducted to determine whether grassland use outside these thermal time windows might endanger the long-term sustainability of the grassland community. Still, the tendency toward increased

timing flexibility in grassland use associated with high abundance-weighted mean leaf dry matter content across grass species was confirmed. Definition of the thermal time windows for each region based on surveys of grasslands at equilibrium could provide recommendations for sustainable exploitation of grasslands.

Tableau 4 : Minimum and maximum thermal time at first use and the corresponding range for each combination of grassland use and class of abundance-weighted mean leaf dry matter content across grass species (LDMCg). For light grazing followed by cutting, two values are provided, one for light grazing and another for the subsequent cutting event. NA means not available. When the number of observations is sufficient, i.e. up to five, for each type of grassland use, the range of thermal time at first use increases with the LDMCg class, offering greater timing flexibility.

Type of grassland use	LDMCg Class	Minimum thermal time at first use ($°C.d^{-1}$)	Maximum thermal time at first use ($°C.d^{-1}$)	Range of thermal time at first use ($°C.d^{-1}$)	Number of observations
Cutting	1	1041	1591	551	16
	2	904	1553	650	26
	3	965	1489	525	2
	4	1489	1489	NA	1
Light grazing followed by Cutting	1	321 - 1239	543 - 1607	221 - 368	12
	2	321 - 1153	687 - 1760	366 - 607	17
	3	445 - 1238	445 - 1238	NA	1
	4	353 - 1459	353 - 1459	NA	1
Grazing by animals for production	1	557	661	104	3
	2	396	905	509	36
	3	407	1024	617	22
Grazing by animals for replacement	2	321	602	281	6
	3	321	862	541	14
	4	434	800	366	8

4.2.3.3. A farm-scale analysis of potential flexibility in grassland use

We selected the most extensively surveyed beef farm (Mou in Tab. 3) for applying the two components of the analysis framework to characterize potential flexibility in grassland use. When projected in the discrimination tree of Figure 19, farm Mou has 63 ha, i.e. fields number 11, 12 and 13 corresponding to summer grasslands in constraint class CS5 that can only be grazed by animals for replacement with low care requirements (Fig. 20). Another 19.6 ha, i.e. fields of constraint classes CS2 and CS7, are only suited for cutting or a light grazing followed by a cut. The remaining 25.9 ha taken into account in the survey, i.e. fields of constraint classes CS1 and CS4, offer organizational flexibility due to several possible types of grassland use, or 24% of the area considered in the study. By comparison, farms Nie and Del have 17% and 98%, respectively.

When several possibilities for grassland use exist for a given class of topographic and farming constraints, preferential grassland use also depends on the land area available in the other constraint classes and for other types of grassland use. Indeed, sufficient area is needed to ensure wintering forage stocks. Of the area suited to a single possible type of grassland use, six fields (numbers 2, 5, 6, 7, 8 and 9) are cut. Fields number 1, 3 and 4, usually grazed, can be used for haymaking to compensate for forage deficits when needed, whereas fields number 2, 5, 6, 7, 8 and 9 still represent additional grazable fodder in case of early drought.

Projections in the thermal time range for grassland first use (Fig. 20) for each combination of type of grassland use and grassland community type revealed that farm Mou has most of its date of grassland first use concentrated around the same thermal time irrespective of the diversity of grassland communities. As an example, cutting events on fields number 5, 6, 7 and 8 occur almost on the same dates despite different grassland community types. For each combination of grassland use and grassland community type, other farms such as Dar show a spread of grassland first uses over the entire thermal time range. There is flexibility currently unused in farm Mou for bringing forward or delaying the use of the grassland fields such as in the case of drought, for example, by anticipating the cutting of field number 6 in order to open up additional grazable area.

The application of the analysis framework to farm Mou offers a sound evaluation of the potential flexibility for adjusting management practices to cope with unexpected events. Aspects of flexibility not considered in our analysis, such as recourse to fertilization, additional machinery or labor, and herd batching may constitute additional ways to accommodate unexpected events. Our analysis is limited to considerations for spring use. The use of grasslands in summer and autumn might be conditioned by the nature of spring use, especially the thermal time windows. Further improvements are needed to provide an overview of the potential flexibility over the course of the year. Nevertheless, the analysis framework constitutes a novel base for evaluating and comparing the spring potential flexibility in space and time between farms. In characterizing the adaptive capacities of farms, the framework indicates which aspect of flexibility is preferable to employ on a farm faced with an unexpected event in order to ensure its sustainability.

4.2.4. Conclusion

The analysis framework presented in this article is a novel way of efficiently characterizing potential flexibility in grassland use on farms in mountainous or less-favored areas. It indicates where and when management practices can be adjusted to cope with unexpected events by evaluating organizational flexibility and timing flexibility in grassland use. In the field of farming system design, organizing agricultural systems and the related production activities under a range of spatial and temporal constraints is a common problem. The quest

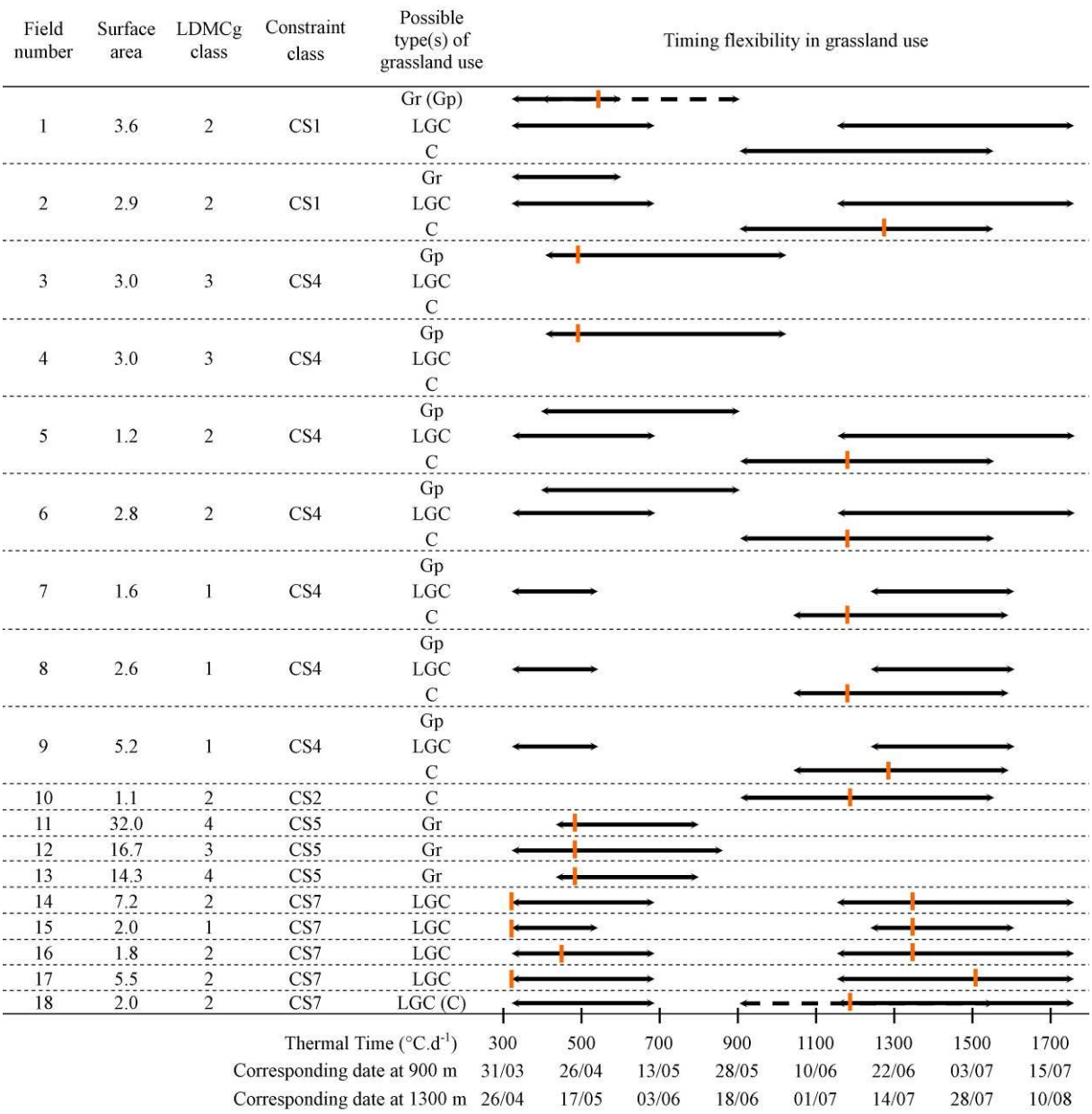


Figure 20 : Overview of organizational flexibility and timing flexibility in grassland use for each field in farm Mou. Types of grassland use are: Gp, grazing by animals for production; Gr, grazing by animals for replacement; LGC, light grazing followed by cutting; C, cutting. Horizontal arrows correspond to the thermal time windows for grassland spring use for each type of grassland use and class of abundance weighted-mean leaf dry matter content across grass species (LDMCg) as presented in Table 4. Vertical lines represent the observed thermal time at first use for each field. Indications of the Julian date at 900 m and 1300 m corresponding to the thermal time scale marks for the average climatic year are specified below the thermal time axis. For fields 1 and 18, the type of grassland use conveyed by the tree of Figure 19 does not match with the observed use in brackets. Corresponding thermal time windows for grassland use are the dashed arrows. When sufficient data were not available in Table 4, arrows were not drawn, such as for cutting on Field 11A. The analysis framework shows that Farmer Mou has organizational flexibility, i.e. several possible types of grassland use, on 24% of the area considered in the study. He also has unused flexibility for bringing forward or delaying the use of the grassland fields but he concentrates the first uses around the same thermal time irrespective of the diversity of grassland communities.

towards more sustainable farming systems requires methods to design such systems while satisfying these constraints. To ensure the credibility of the outputs, exploration by farm-scale simulation requires reliable facts on which to build the alternative strategies to be tested. Our analysis framework provides such information. It may be used as a first step for pointing out the conditional adaptations to the production plan (Garcia et al., 2005) that should be tested in simulation scenarios. In this way, dynamic simulation modeling could allow flexible management strategies suited to ensuring the sustainability of farming systems in the face of unexpected events to be identified. Exploitation of flexibility at field level depends on considerations on the farm scale, such as availability of labor and machinery. Verifying the consistency and feasibility of the flexible management strategies to be tested can only be achieved by simulating the dynamic implementation of the farm management activities. This can hardly be done with an ex-ante analysis. That is why the analysis framework is a component of a larger simulation project (Martin et al., 2008) aiming at designing sustainable grassland-based livestock farming systems.

Acknowledgements

The work presented in this publication is funded by the French ANR ADD projects TRANS (TRANSformations de l'élevage et dynamiques des espaces – ANR-05-PADD-003), PRODDIG (PROmotion du Développement Durable par les Indications Géographiques – ANR-05-PADD-012) and VALIDATE (Vulnerability Assessment of LIvestock and grasslanDs to climAte change and exTreme Events – ANR-07-VULN-011). The authors are grateful to the eight farmers involved in the study for their fruitful collaboration, their time, and their investment. We thank Alan Scaife for the English revision and the anonymous reviewers for their helpful comments.

4.3. A multi-site study to classify semi-natural grassland types

G. Martin[a,d,*], P. Cruz[a], J.P. Theau[a], C. Jouany[a], P. Fleury[b], S. Granger[c], R. Faivre[d], G. Balent[e], S. Lavorel[f,g], M. Duru[a]

[a] : INRA, UMR 1248 AGIR, F-31326 Castanet Tolosan, France

[b] : ISARA-Lyon and GIS Alpes du Nord, Agrapole, Département SSG, F-69364 Lyon, France

[c] : INRA-ENESAD-Université de Bourgogne, UMR 1210 BGA, F-21000 Dijon, France

[d]: INRA, UR 875 UBIA, F-31326 Castanet Tolosan, France

[e]: INRA, UMR 1201 DYNAFOR, F-31326 Castanet-Tolosan, France

[f] : Laboratoire d'Ecologie Alpine, CNRS UMR 5553, Université Joseph Fourier, F-38041 Grenoble, France

[g]: Station Alpine Joseph Fourier, CNRS UMS 2925, Université Joseph Fourier, F-38041 Grenoble, France

[*]: Corresponding author at: INRA, UMR 1248 AGIR, F-31326 Castanet Tolosan, France. Tel.: +33 5 61 28 54 75; fax: +33 5 61 73 55 37. E-mail address: guillaume.martin@toulouse.inra.fr (G. Martin).

Received 30 June 2008

Received in revised form 7 November 2008

Accepted 11 November 2008

Available online 18 December 2008

Abstract

Calibration and validation of simulation models describing herbage growth or feed quality of semi-natural grasslands is a complex task for agronomists without investing effort into botanical surveys. To facilitate such modelling efforts, a limited number of grassland types were identified using a functional classification of species. These grassland types were characterized by three descriptors required to model herbage growth or feed quality: the abundance-weighted mean leaf dry matter content across grass species, the relative abundance of grasses, and an estimate of species richness. We conducted a multi-site analysis over 749 grasslands from eight temperate regions in France and northern Spain. Using Restricted Maximum Likelihood models, explanatory variables having a significant impact on the descriptors of grassland vegetation were identified. These were management type and nutrients availability described either with an ecological approach based on Ellenberg nutrient indices, or an agronomic approach based on plant nutrition indices. By fixing expert-assigned boundaries along the gradients of management type and nutrients availability, we identified a classification of 3 x 3 semi-natural grassland types. When compared pairwise with a Kruskal–Wallis test, the identified semi-natural grassland types showed significant differences for vegetation descriptors. The model inputs corresponding to

different semi-natural grassland types led to simulated differences in herbage growth and feed quality comparable with the uncertainty on the model output. This confirmed the relevance of the classification based only on nine species-rich semi-natural grassland types easily identifiable on the field to model herbage growth or feed quality.

Keywords:

Semi-natural grassland / Classification / Management type / Nutrients / Functional traits / Species richness

4.3.1. Introduction

Simulation models describing herbage growth or feed quality have been developed recently (e.g. McCall and Bishop-Hurley, 2003). Such simulation models have been calibrated and validated for ray grass-clover swards or monospecific grass stands. For seminatural grasslands, the calibration and validation of models simulating herbage growth or feed quality raises two main problems. First semi-natural grasslands comprise a wide diversity of plant communities with different botanical compositions. Second, calibration and validation may be too site-specific if based on sites where locally restricted species are encountered.

Agronomists involved in the simulation of herbage growth or feed quality need representations to capture the grassland types they encounter through a rapid appraisal by interviewing the farmer about his practices and without investing effort into botanical surveys. Thus, similar to Smart et al. (2003) on wider vegetation systems, this work was intended to classify seminatural grasslands into a limited number of types. These grassland types needed to be easily identifiable according to management practices observed in the field, e.g. grazing vs. cutting, and to environmental factors easily measurable such as soil fertility. They also needed to capture differences made in the field by agronomists, extension services and farmers, such as the classes of nutrient poor, intermediate and nutrient-rich conditions. Lastly, these grassland types had to be provided with vegetation descriptors that can be used as inputs of simulation models describing herbage growth or feed quality.

One way to obtain model inputs usable for any site has been to emphasize a functional plant ecology approach. Plant traits are generic whereas species and taxonomic groups are restricted in distribution (Pakeman, 2004). That is why recent simulation models developed for semi-natural grasslands (Quétier et al., 2007a; Duru et al., 2009a) have adopted a functional representation of grassland vegetation. In these models, semi-natural grassland vegetation has been characterized in terms of dominant grass functional groups based on leaf dry matter content (LDMC), and of life forms distribution (grasses vs. dicotyledons). A LDMC-based ranking has been found to discriminate species according to their strategy for nutrient capture and use (Diaz et al., 2004), and to their tolerance to defoliation (Cruz et al.,

2002). LDMC measurements have ranked species in the same order independently of frequency of defoliation events (Da Pontes et al., 2007) and nutrient availability (Al Haj Khaled et al., 2005; Da Pontes et al., 2007), across years and sites (Diaz et al., 2004; Lavorel et al., 2008). Individual species LDMC as well as the abundance-weighted mean LDMC across grass species (gwmLDMC) have been found to be well correlated with species relative growth rate (Kazakou et al., 2006), with species and plant community phenology, growth pattern and temporality (Ansquer et al., 2008), and with species and plant community feed quality (Al Haj Khaled et al., 2006; Da Pontes et al., 2007). Given all these features, gwmLDMC has provided a powerful functional marker (Garnier et al., 2004) and descriptor of grassland vegetation that could be used as an input in simulation models describing the dynamics of herbage growth (e.g. in Duru et al., 2009a) and feed quality (e.g. in Duru et al., 2008a). Dicotyledons have generally displayed a higher feed quality compared to grass species (Hacker and Minson, 1981). Thus, life form distribution, i.e. the relative abundances of grasses (%GRASS), rosettes and legumes, has been used as an input parameter to model herbage feed quality reliably (Duru, 1997). Finally, species richness (SpRi) has constituted a valuable environmental indicator when studying the impacts of grassland management strategies on ecosystem services as it quantifies a farming externality (Bignal and McCracken, 2000).

Changes in functional traits, functional groups, and species richness of semi-natural grasslands have been found to be mainly determined by nutrients availability and management type (Grime, 1973; Lavorel and Garnier, 2002; Garnier et al., 2007). Other factors like soil moisture, altitude, and climate (de Bello et al., 2006) have been found to play a role as well.

The present study aimed at developing a classification of easily identifiable semi-natural grassland types suited for simulation of herbage growth or feed quality in European temperate regions below the altitude of 1500 m. It required as a first step to test the response of grassland vegetation in terms of the three descriptors cited, gwmLDMC, %GRASS and SpRi, to management and environmental factors, i.e. management type, nutrients availability and climate. As a second step, the management and environmental factors showing a significant effect on vegetation descriptors were assigned boundaries to identify semi-natural grassland types. Finally, differences between grassland types for vegetation descriptors were validated.

4.3.2. Materials and methods

4.3.2.1. Data sources

The eight surveys of the data network were conducted in temperate regions of France and northern Spain (Basque country). They consisted in the recording of botanical data, of farmers' management practices on the grassland, and in some cases in the measurement of a plant nutrition index (see below). Our approach implied stable management practices when considering grassland past history so as to analyze only semi-natural grasslands in a dynamic equilibrium (Huston, 1994).

These eight surveys were not conducted on the same year and differed in the spatial scale of the data collection and overall in the method of floristic survey (Tab. 5). Floristic composition was assessed with exhaustive inventories of plant species, using either one of two exhaustive methods, the point quadrat line survey and the abundance-dominance method, or the frequency-rank method, which considers only dominant species. This methodological difference for floristic surveys could have resulted in lower values for species richness in the case of data gathered with the frequency-rank method as those species that did not represent a sufficient proportion of the biomass were not counted. Analyses of gwmLDMC and %GRASS included all data whatever the floristic survey method used (Lavorel et al., 2008). To avoid possible artifacts, later analyses on species richness were carried out only with the data obtained using the point quadrat survey lines.

Since the literature in ecology and agronomy has not shown general agreement on a single method for quantifying nutrients availability, two frequently used methods were investigated. The first was an ecological method often found in the literature based on floristic observations and the Ellenberg index database (Ellenberg et al., 1992), which characterizes species habitat preference, inter alia, with regard to nitrogen on a scale from 1 to 9. It was used to calculate an Ellenberg abundance-weighted mean nitrogen index across the plant community (cwmEllenberg) as $cwmEllenberg = \sum_i pi.Ellenberg$ where pi was the relative abundance of the ith species and Ellenbergi was the Ellenberg index value of the ith species. Species found across broad ecological gradients (Ellenberg index value = X) and species not available in the Ellenberg database were excluded from the calculation. The advantage of Ellenberg nutrient index values is that they include an integration of plant species behavior over many years (Schaffers and Sykora, 2000). The cwmEllenberg index value for nitrogen has been found to be well correlated with P and K availability in the topsoil (Schaffers and Sykora, 2000), thus it has been presented as an indicator of the overall nutrient status of a grassland. A major limitation to Ellenberg indices is that the attribution of

Tableau 5 : Description of the eight databases used for the purpose of this study. Climatic data are averages over the past 30 years.

Survey region		Jura	Northern Alps	Aubrac	Central Pyrenees	Aveyron	Auxois	Eastern Pyrenees	Basque country
Observer		Fleury	Fleury	Balent	Balent	Balent	Granger	Theau	Maestre
Latitude / Longitude		46°24N 5°58E	45°52N 6°19E	44°37N 2°59E	42°47N 0°30E	44°22N 2°49E	47°15N 4°33E	42°50N 1°17E	43°37N 07°48E
Year for botanical survey		2002	1991	1989	1981	1988	1989	2001	1987
Spatial scale		about 10 km	about 150 km	about 50 km	about 1 km	about 35 km	about 50 km	about 1 km	about 100 km
Altitude range		500-1200 m.a.s.l.	500-1200 m.a.s.l.	900-1200 m.a.s.l.	900-1250 m.a.s.l.	200-1100 m.a.s.l.	300-600 m.a.s.l.	500-1200 m.a.s.l.	300-600 m.a.s.l.
Number of data		67	124	55	61	68	30	241	103
Method for floristic survey		Abundance-Dominance	Abundance-Dominance	Quadrat point line	Quadrat point line	Quadrat point line	Frequency-rank	Frequency-rank	Quadrat point line
Available data for	Nutrients availability	/	/	Mineral nutrition indices	Mineral nutrition indices for 18 fields	Mineral nutrition indices	Mineral nutrition indices	Mineral nutrition indices	Mineral nutrition indices
	Management practices	Management type	Management type	Management type	Management type	Management type	Management type	Management type	Management type
Mean annual temperature (°C)		5.2	8.9	6.8	10.6	10.8	10.5	11.8	13.6
Mean annual rainfalls (mm)		2054	1736	861	964	971	732	1014	1331
Annual evapo-transpiration (mm)		674	965	816	1109	1182	1089	1200	1204
Thornwaite's aridity index		0	4	40	35	40	49	32	29
Annual growing degree days		2119	3305	2501	3859	3958	3846	4339	4983
PCA1		-3.80	-1.47	-1.06	0.80	1.19	1.26	1.39	1.70
Species encountered in the zone during the survey		140	144	134	217	277	52	97	150

the values to the different species is based on empirical knowledge.

The second method, the average plant nutrient index (ANI), was an agronomic one based on the nitrogen nutrition index (Lemaire and Gastal, 1997) representing the extent of nitrogen and phosphorus limitation experienced by the plant in achieving the potential growth permitted by local weather conditions. Lemaire and Gastal (1997) introduced the concept of critical N concentration ($\%Nc = 100 \times 4.8 (\text{herbage dry matter})^{-0.32}$) representing the negative relationship between N concentrations in herbaceous vegetation and dry matter accumulation called the N dilution curve. The ratio (on a percent basis) between the actual and the critical N concentration has been called the nitrogen nutrition index (NNI). Following Duru and Ducrocq (1997), we adjusted the NNI according to the phosphorus nutrition index (PNI) (Jouany et al., 2004) as:

If $PNI \geq 80$, $ANI = NNI$

If $PNI < 80$, $ANI = NNI - 3{,}2 - 0.0062 \times PNI \times (80 - PNI)$

The ANI is based on a field measurement in a given year for the first growing cycle; thus it does not include integration over time as Ellenberg indices do. The main limitation is that it can vary between years and within a growing period (Duru et al., 1997), although these variations have been found to be smaller than those of nitrogen concentration, a plant trait frequently used by ecologists (e.g. Garnier et al., 2004; Kazakou et al., 2006). As we did not have measurements of ANI for all the grasslands included in the analysis (Tab. 5), the number of data points was higher for cwmEllenberg than for ANI.

Description of management type was restricted to a coarse separation between grazing, mixed use and cut grasslands. In a previous inter-site study, Garnier et al. (2007) suggested that there were similarities in responses of grassland mean functional traits to management in spite of inter-site differences in specific management type (grazing, cutting, and mixed use).

Following Garnier et al. (2007), climate was quantified using a compound index, i.e. the coordinates of a site on the first axis (explaining 75% of the variance) of a principal component analysis of climatic variables (PCA1): mean annual temperature (weight on the first axis: 0.48), total annual rainfall (-0.39), annual evapotranspiration (0.49), Thornwaite's aridity index (0.40) and annual growing degree days (GDD) (0.47), i.e. the sum of all monthly average temperatures between 0°C and 18°C (Duru et al., 2009a) over the whole year to avoid biogeographic peculiarities related to the date for initiating the degree day sum calculation. The eight survey regions were spaced along a climatic gradient (Tab. 5) from the coolest and rainiest region (negative values for PCA1: Jura, Northern Alps, Aubrac) to the warmest but still rainy region (most positive values for PCA1: Central Pyrenees, Aveyron,

Auxois, Eastern Pyrenees, Basque country).

4.3.2.2. Calculation of vegetation descriptors

The dominant species have been found to adequately describe the response of a plant community to environmental or management practice changes (Grime, 1998). Grass species are generally the dominant component of semi-natural grassland vegetation biomass, and display the widest range of trait values and the most significant variations across species (Cruz et al., 2002; Kazakou et al., 2006). For each grassland field of the dataset, an abundance-weighted mean LDMC was calculated across grass species only as $gwmLDMC = \sum_i p_i.LDMC_i$ where pi was the relative abundance of the ith grass species and $LDMC_i$ was the LDMC of the ith grass species determined from available LDMC databases. %GRASS was calculated as the relative abundance of grasses over the whole plant community.

Two LDMC databases were used to calculate gwmLDMC. The first one, hereafter called Botanical Garden (see Al Haj Khaled et al., 2005), was obtained by growing pure stands of grass species under standardized conditions with non-limiting nitrogen supply. The second one, hereafter called Field, was obtained from a network of grassland surveys conducted in temperate French regions that matched the locations of the following study sites: Aubrac, Aveyron, Central Pyrenees, and Eastern Pyrenees. In each case, species not available in the trait database were excluded from the calculation. Twelve grassland fields that showed dominance of a species or a few species not available in the trait databases were excluded from the dataset to avoid a biased estimated gwmLDMC calculated on minor species.

4.3.2.3. Data processing and statistical analysis

The responses of gwmLDMC, %GRASS and SpRi to management type, nutrients availability, i.e. either cwmEllenberg or ANI, and climate were analyzed using mixed effect linear models. The mixed model method was chosen to take into account both fixed and random effects of explanatory variables. Management type, nutrients availability and average climatic conditions were considered as fixed effects while site was modelled as a random effect. This random term was described by a specific variance parameter different from the error term variance parameter. For such mixed models, the restricted maximum likelihood (REML) estimate method was considered to be most appropriate as the estimates of variance parameters are unbiased, unlike those of maximum likelihood estimates.

First, dependencies among explanatory variables were analyzed pairwise using REML with site as a random term. It aimed at identifying covariance patterns among explanatory variables, i.e. management type as a categorical variable with three classes (grazing, mixed

use, and cutting), nutrients availability being either cwmEllenberg or ANI, and average climatic conditions (PCA1). The same analysis was conducted among response variables to determine whether gwmLDMC calculated with the two trait databases (Botanical Garden and Field) produced consistent outputs. A final preliminary analysis aimed at checking whether gwmLDMC co-varied consistently with %GRASS and SpRi.

The response of vegetation descriptors to environmental and management factors, i.e. management type, nutrients availability and climate, was analyzed using the same methods. Starting with the full fixed model, non-significant interactions in the set of explanatory variables were progressively eliminated after a series of REML analyses. A model with effects of all explanatory variables taken as fixed additive terms was obtained:

$$gwmLDMC_{i,j,k} = \mu + Management_type_i + ANI_j + PCA1_k + Site_k + \varepsilon_{i,j,k}$$

where ANI could be replaced by cwmEllenberg and gwmLDMC could be replaced by %GRASS and SpRi.

The two explanatory variables that showed a significant effect on the response of vegetation descriptors were further used for the classification of semi-natural grassland types. Clustering methods have been criticized for their high dependency on the dataset for the determination of cluster sizes (Venables and Ripley, 1994). The boundaries between grassland types along the two selected axes were determined based on the literature data and expert opinion. A number of three classes per axis, and boundary values were chosen so as to ensure that an agronomist interviewing a farmer could assign class values without measurements and indecision. The three classes of management type used in the first part of the analysis were kept as such in the classification. For ANI, values below 40 are unusual in semi-natural grasslands due to fertilization, internal cycling of nutrients and faeces of grazing animals. In addition, the accuracy of the measurement and the seasonal variations of the index has been found to result in an uncertainty on the values of about 10 (Duru, 1992). The range 40–100 was divided into three even classes characterizing the three classes of nutrient conditions routinely used by agronomists corresponding to nutrient-poor, intermediate and nutrient-rich conditions (cf. Duru and Calviere, 1996). Ellenberg values below 3 are mostly unprobable in grasslands as such values reflect extremely infertile conditions such as abandoned land. Above 8, Ellenberg values reflect extremely rich conditions for sown grasslands or cropping. Thus semi-natural grasslands are most probably in the range 3–8 in semi-natural grasslands. Following Manhoudt et al. (2007) we divided the range 3–8 into three classes: below 4, between 4 and 6 and above 6. Non-parametric Kruskal–Wallis tests were used to evaluate whether the differences between semi-natural grassland types were statistically significant for gwmLDMC, %GRASS and SpRi. Statistical analyses were carried out using the statistical package R (R Development Core Team, 2005).

4.3.3. Results

4.3.3.1. Dependencies among variables

Results of the REML analysis of pairwise relationships among explanatory variables (Tab. 6) showed a highly significant correlation between cwmEllenberg and ANI value ($P < 0.001$), confirming that both indices produce consistent estimates of nutrients availability. Management type as a categorical variable was positively correlated with cwmEllenberg and ANI ($P < 0.001$). Compared to grazing, mixed use and overall cutting was associated with richer nutrient conditions. There was no significant association between climate (PCA1) and management type or climate and nutrients availability.

With vegetation descriptors, the REML analysis showed a highly significant and consistent relationship between gwmLDMC values calculated with the two databases Botanical Garden and Field ($P < 0.001$) (Tab. 7). gwmLDMC decreased with increasing %GRASS ($P < 0.05$) and was associated with decreasing SpRi ($P < 0.001$). Decreasing %GRASS was associated with increasing SpRi ($P < 0.001$).

Tableau 6 : REML analysis of pairwise relationships among explanatory variables: management type, climate (PCA1) and nutrients availability indices (cwmEllenberg, ANI). F(NDF, DDF) = F-test with degrees of freedom in the numerator (NDF) and the denominator (DDF). By significant correlation (P < 0.05), the direction of change of the title column variable by increase of the left column variable is given in parentheses.

Variable	Management type		PCA1		ANI	
	F(NDF,DDF)	P value	F(NDF,DDF)	P value	F(NDF,DDF)	P value
PCA1	F(1,6)=0.6	0.484	-	-	-	**-**
ANI	F(1,510)=19.1	**<0.001** (+)	F(1,4)=0.5	0.538	-	-
cwmEllenberg	F(1,742)=115.9	**<0.001** (+)	F(1,6)=0	0.997	F(1,513)=60.7	**<0.001** (+)

Tableau 7 : REML analysis of pairwise relationships among output variables, i.e. abundance-weighted mean leaf dry matter content across grass species (gwmLDMC Botanical Garden and Field), relative abundance of grasses (%GRASS) and species richness (data from point quadrat line survey only). F(NDF, DDF) = F-test with degrees of freedom in the numerator (NDF) and the denominator (DDF). By significant correlation (P < 0.05), the direction of change of the title column variable by increase of the left column variable is given in brackets.

Variable	gwmLDMC Botanical Garden		gwmLDMC Field		%GRASS	
	F(NDF,DDF)	P value	F(NDF,DDF)	P value	F(NDF,DDF)	P value
gwmLDMC Field	**-**	**-**	**-**	-	F(1,743)=6.0	**0.014** (-)
gwmLDMC Botanical Garden	**-**	**-**	F(1,744)=2129.0	**<0.001** (+)	F(1,744)=5.0	**0.025** (-)
Species richness	F(1,285)=13.1	**<0.001** (+)	F(1,285)=15.3	**<0.001** (+)	F(1,283)=11.0	**<0.001** (-)

4.3.3.2. Responses of vegetation descriptors

Abundance-weighted mean leaf dry matter content across grass species (gwmLDMC) decreased in response to management type and nutrients availability ($P < 0.001$) (Tab. 8), with grazed and/or nutrient-poor grasslands showing higher gwmLDMC values compared to cut and/or nutrient-rich grasslands. Among the two databases used for gwmLDMC calculation, the use of the Botanical Garden LDMC database produced the least uncertainty in the gwmLDMC prediction, i.e. the sum of σ site and σ residual term (Tab. 8). This uncertainty was lower with ANI as compared to cwmEllenberg with the two databases used for gwmLDMC calculation.

%GRASS increased with cutting as compared to grazing when considering ANI as nutrients availability index ($P < 0.05$) (Tab. 8). In nutrient-poor conditions, cut grasslands showed higher %GRASS compared to grazed grasslands, the opposite being true in nutrient-rich conditions. ANI did not significantly affect %GRASS. The same trend was observed when using cwmEllenberg as the nutrients availability index. As compared to grazing, cutting significantly increased %GRASS ($P < 0.05$) in nutrient-poor conditions, and the opposite was observed in nutrient-rich conditions. cwmEllenberg was positively correlated with %GRASS ($P < 0.001$).

SpRi was negatively correlated with nutrients availability whichever index was used ($P < 0.1$) (Tab. 8). When using ANI as nutrients availability index, it was also negatively correlated with management type as a categorical variable ($P < 0.05$). However, grazed grasslands were more species-rich than cut grasslands in nutrient-poor conditions only (data not shown). In richer nutrient conditions, cut grasslands showed higher SpRi.

In contrast to management type and nutrients availability, climate had no significant effect on the output variables, i.e. gwmLDMC, %GRASS and SpRi, except when gwmLDMC was calculated using the Botanical Garden database (Tab. 8).

4.3.3.3. Semi-natural grassland classification

Based on the results of the REML analysis, management type and nutrients availability were integrated into the semi-natural grassland classification and climate was excluded. The output was a semi-natural grassland classification identifying nine seminatural grassland types, i.e. a combination of 3 x 3 types along the two selected axes (Fig. 21). All nine semi-natural grassland types were assumed possible and the dataset used in the present study provided cases for each semi-natural grassland type.

Shifts towards richer nutrient conditions either with cwmEllenberg or ANI induced a significant decrease in gwmLDMC Botanical Garden and Field in most cases (Figs. 21 and 22; results of Kruskal–Wallis tests not shown). Compared to ANI, cwmEllenberg associated a

Tableau 8 : REML analysis of management type, nutrients availability (cwmEllenberg: upper part of the table or ANI: lower part of the table) and climate (PCA1) on abundance-weighted mean leaf dry matter content across grass species (gwmLDMC Botanical Garden and Field), relative abundance of grasses (%GRASS) and species richness (SpRi, data from point quadrat line survey only) as specified in Section 2.3. Standard errors due to the site random term and to the residual term are quantified for each model (one model per column). F(NDF, DDF) = F-test with degrees of freedom in the numerator (NDF) and the denominator (DDF). By significant correlation (P < 0.1), the direction of change of the title column variable by increase of the left column variable is given in brackets.

	Variable	gwmLDMC Botanical Garden		gwmLDMC Field		%GRASS		SpRi	
		F(NDF,DDF)	P value	F(NDF,DDF)	P value	F(NDF,DDF)	P value	F(NDF,DDF)	P value
With cwmEllenberg	Management type	F(1,690)=113.5	**<0.001** (-)	F(1,731)=103.4	**<0.001** (-)	F(1,745)=6.2	**0.013** (+)	F(1,283)=1.0	0.309
	cwmEllenberg	F(1,745)=461.1	**<0.001** (-)	F(1,745)=380.3	**<0.001** (-)	F(1,741)=14.1	**<0.001** (+)	F(1,274)=67.2	**<0.001** (-)
	PCA1	F(1,6)=12.8	**0.012** (-)	F(1,6)=0.1	0.785	F(1,6)=0.3	0.615	F(1,2)=0.1	0.747
	σ Site	4.4		6.5		0.15		2.8	
	σ Residual term	10.3		11.7		0.14		8.3	
	n	749		749		749		287	
With ANI	Management type	F(1,315)=77.4	**<0.001** (-)	F(1,464)=55.3	**<0.001** (-)	F(1,509)=4.7	**0.031** (+)	F(1,240)=5.0	**0.026** (-)
	ANI	F(1,463)=35.2	**<0.001** (-)	F(1,510)=23.1	**<0.001** (-)	F(1,508)=1.9	0.172	F(1,240)=3.0	**0.087** (-)
	PCA1	F(1,4)=19.2	**0.012** (-)	F(1,4)=2.3	0.202	F(1,4)=0.4	0.571	F(1,2)=0.1	0.822
	σ Site	1.2		3.3		0.18		4.6	
	σ Residual term	11.6		12.4		0.15		9.2	
	n	515		515		515		244	

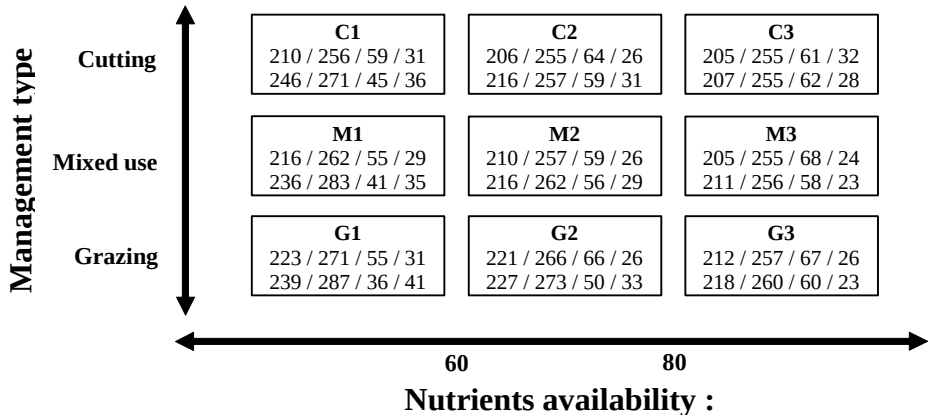


Figure 21 : Semi-natural grassland classification with the 3 x 3 grassland types along two axes: nutrients availability, i.e. ANI and management type. The same representation could be made with cwmEllenberg as nutrients availability index instead of ANI. The boxes representing the nine grassland types contain on the first line the name of the grassland type, and on the second and third lines, the median values for gwmLDMC Botanical Garden and Field in mg g^{-1}, %GRASS in % and SpRi in number of species for the classification with ANI and cwmEllenberg respectively.

larger change in gwmLDMC to each change of class along the nutrients availability axis (Figs. 21 and 22). The ANI-based classification displayed more numerous significant changes of gwmLDMC associated with the management types. The use of the two trait databases Botanical Garden and Field displayed similar capacity for characterizing significant changes in gwmLDMC along the two axes of the semi-natural grassland classification. As expected from the results of the REML analysis, whatever the nutrients availability index, %GRASS of the nine semi-natural grassland types were predicted with much uncertainty (Fig. 22), i.e. with average coefficients of variation of 32% and 27% around the %GRASS median for cwmEllenberg and ANI respectively. Still, with the cwmEllenberg-based classification, changes of class of nutrients availability induced significant changes in %GRASS (Figs. 21 and 22; results of Kruskal–Wallis tests not shown), whereas the ANI-based classification did not perform very well in characterizing changes of %GRASS. The opposite trend was observed for shifts in management type with more numerous significant changes in %GRASS obtained for the ANI-based classification. Changes in SpRi in response to both nutrients availability and management type were hardly significant with either cwmEllenberg or ANI. Again, wide variation around the median was observed (Fig. 22).

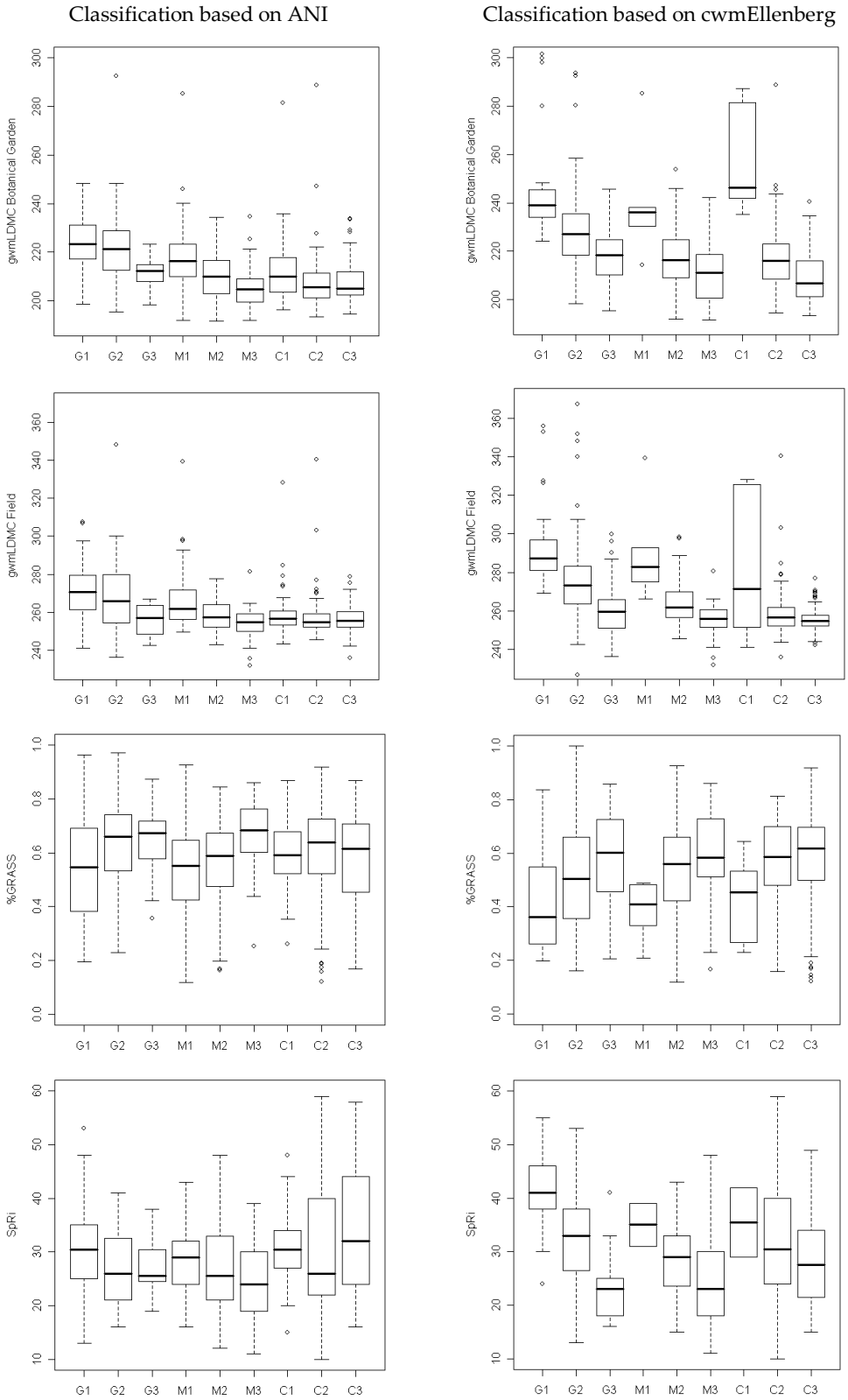


Figure 22 : Distribution of fields belonging to each of the nine grassland types along the axis of the three vegetation descriptors (gwmLDMC Botanical Garden and Field in mg g^{-1}, %GRASS in % and SpRi in number of species) for classifications with ANI (graphs to the left) and with cwmEllenberg (graphs to the right) as nutrients availability index. Boxes represent the interquartile range containing 50% of values; the line across the boxes corresponds to the median value; whiskers are the highest and lowest values excluding outliers, i.e. cases with values up to 1.5 box lengths from the upper and lower edge of the box.

4.3.4. Discussion

4.3.4.1. Responses of vegetation descriptors

Consistent with previous findings (Garnier et al., 2004; Quétier et al., 2007b), gwmLDMC decreased with richer nutrient conditions. In spite of the coarse characterization of management, gwmLDMC decreased with cutting compared to mixed use or grazing, and with mixed use compared to grazing, consistent with Farruggia et al. (2006).

Using cwmEllenberg as an indicator for nutrients availability, %GRASS significantly increased with nutrients availability and was not significantly affected by management type. This was consistent with previous findings (Willems and van Nieuwstadt, 1996). In contrast, but confirming other findings (Dorrough et al., 2004; Marini et al., 2007), %GRASS increased with both ANI and change from grazing to cutting. A high standard error, expressed as the sum of σ site and σ residual term on the predicted %GRASS, was found with both nutrients availability indices (Tab. 8), associated with a wide variation around the median for each semi-natural grassland type (Fig. 22). Thus the response of %GRASS along the nutrients availability axis may not be linear, thereby explaining the low consistency of the results obtained.

Results related to SpRi were analyzed in the light of the intermediate disturbance hypothesis (Grime, 1973), i.e. species diversity peaks under intermediate disturbance regimes and intermediate nutrients availability. When considering cwmEllenberg and ANI, 94% and 82% respectively of the dataset used for SpRi-related analysis was above the median + 5% of the nutrients availability scales, representing the nutrient-rich side of the Gaussian curve of the intermediate disturbance hypothesis. As already observed (Grime, 1973; Willems and van Nieuwstadt, 1996; Marini et al., 2007), SpRi displayed a significant linear negative response to nutrients availability on the nutrient-rich side of the Gaussian curve. When excluding the data located on the nutrient-poor side of the Gaussian curve from the analysis, the outputs were hardly changed (results not shown). Only the standard error on the predicted SpRi (the sum of σ site and σ residual terms) decreased when considering ANI as nutrients availability index. Most published research findings on response of SpRi to different grassland management regimes considered separately either grazing effects (Dorrough et al., 2004; Diaz et al., 2007) or cutting effects (Calvo et al., 2005; Marini et al., 2007). Since the dataset used in this study did not provide information about management intensity, our results were not interpreted in the light of these previous findings. Still, the effect of management type on SpRi was found to depend on nutrients availability. The direction of effects was however opposite to Maurer et al. (2006) who found that unfertilized hay meadows were species-richer than unfertilized pastures, whereas the opposite were observed in fertilized conditions. Similar to the observations of Quétier et al. (2007b), changes of SpRi in response

to ANI and management type were limited in average to 4 and 2 species respectively in grasslands containing about 30 species. Changes along the nutrients availability axis were more marked with cwmEllenberg, in average a six-species change.

4.3.4.2. Implications for modelling

The choice of a given nutrients availability index had implications for the use of the semi-natural grassland types identified. As shown in Figures 21 and 22, for a single grassland type, depending on the index selected for nutrients availability, the median values for vegetation descriptors were significantly different in some cases with average differences of 5% (χ^2 = 4.3; P = 0.038), 3% (χ^2 = 1.9; P = 0.171), 21% (χ^2 = 5.1; P = 0.024) and 8% (χ^2 = 1.3; P = 0.249) for gwmLDMC Botanical Garden, gwmLDMC Field, %GRASS and SpRi respectively.

Compared to the classification based on ANI, the one built with cwmEllenberg displayed larger differences between grassland types in gwmLDMC (Figs. 21 and 22). This was because the two indices used to characterize nutrients availability did not have the same meaning. Thus for projects on short to medium timescales, such as Andrieu et al. (2007b) and Martin et al. (2008), that require a fine modelling of year-to-year variations in herbage growth and feed quality, the classification based on ANI is more suitable as it can account for the short-term effects of management and its effects on mineral nutrition. However, on longer time scales such as Hill and Carey (1997), the classification based on cwmEllenberg is more suitable as it changes together with vegetation composition and so with gwmLDMC in a slow and consistent manner that may better reflect such long-term processes.

Using two trait databases Botanical Garden and Field led to comparable efficiency of the semi-natural grassland classifications in characterizing differences between grassland types (Figs. 21 and 22). When working in similar environmental conditions to those on which the trait database Field was built, i.e. Aubrac, Aveyron, Central Pyrenees, and Eastern Pyrenees, both semi-natural grassland classifications could be used. When, because of different environmental conditions, the applicability domain of the Field database becomes questionable, it is more suitable to use the seminatural grassland classification based on the Botanical Garden trait database which was obtained in non-limiting nutrient conditions (Al Haj Khaled et al., 2005), with climate as a uniform external factor.

The nine distinct semi-natural grassland types were justified in each of the four classifications based on the two nutrients availability indices and the two trait databases, i.e. all nine types had at least one significant difference for one vegetation descriptor (gwmLDMC, %GRASS or SpRi) when compared to neighboring semi-natural grassland types in the classification. The degree of distinction achieved with these nine types was sufficient regarding the accuracy of simulation models of herbage growth and feed quality.

The simulations of herbage growth conducted with the model of Duru et al. (2009a) had a root mean square error of 54 g m^{-2}. The most important difference of gwmLDMC Field in the classification based on cwmEllenberg was a 39 mg g^{-1} decrease between G1 and C3 (Fig. 21), corresponding to a 195°C d^{-1} difference at the beginning of the reproductive phase. At that time, a 195°C d^{-1} difference corresponded roughly to additional simulated biomass of 60 g m^{-2} (Duru et al., 2009a). With feeding value, the simulations of herbage digestibility conducted with the model of Duru et al. (2008a) had a root mean square error of 40 g kg^{-1}. The most important difference of %GRASS in the classification based on cwmEllenberg was a 26% increase between G1 and C3 (Fig. 21). A 26% increase of %GRASS induced a 60 g kg^{-1} decrease of herbage digestibility (Duru, 1997). The model inputs corresponding to different semi-natural grassland types then led to simulated differences in herbage growth and feed quality comparable with the uncertainty on the model output. This confirmed the relevance of limiting the division of the gradients of nutrients availability and management type to three classes only in order to remain within the validity domain of the simulation models currently available.

Acknowledgements

This study was partly funded by the French ANR ADD project TRANS (TRANSformations de l'élevage et dynamiques des espaces—ANR-05-PADD-003). Botanical data from Aubrac and Aveyron were funded by the agriculture extension services of the Aveyron department. Botanical data from Central Pyrenees were funded by the European Union. We are grateful to Maria-Rosa Maestre for providing unpublished data on the Basque Country grassland. Botanical data from the Northern Alps and Jura were collected in the framework of the Groupement d'Intérêt Scientifique Alpes du Nord. We thank Alan Scaife for improving the English writing and the anonymous reviewers for their challenging comments on an earlier version of this manuscript.

5. Application à l'analyse et à la conception réglée de systèmes fourragers

5.1. Introduction

Le Chapitre 4 a fourni un cadre pour caractériser la flexibilité potentiellement exploitable pour l'utilisation des parcelles en herbe, et les conséquences potentielles d'un changement d'utilisation sur la composition fonctionnelle des communautés végétales. Ces connaissances constituent un complément aux outils de diagnostic des pratiques d'éleveurs déjà disponibles à l'échelle de la parcelle (Chazelas et Theau, 2008). Ces outils de diagnostic permettent de pointer sur chaque parcelle les actes techniques de l'éleveur à modifier, et la nature des modifications à mettre en œuvre pour concevoir des systèmes fourragers qui fassent un usage efficient des processus biologiques, en valorisant la diversité fonctionnelle végétale et animale et du territoire d'exploitation. La question se pose toutefois de savoir quelle part des recommandations issues d'un tel diagnostic est applicable lorsque l'on intègre les contraintes rencontrées par l'éleveur au quotidien à l'échelle du système, par exemple sur l'utilisation de la main d'œuvre et du matériel agricole. La simulation dynamique utilisant le modèle présenté dans le Chapitre 3 permet cette évaluation systémique et constitue donc, dans ce cas, une étape complémentaire et essentielle de la conception réglée de systèmes fourragers réalistes. La Section 5.2., qui s'appuie sur un article soumis à *Fourrages*, présente une application d'une démarche couplant diagnostic de pratiques d'éleveurs et modélisation systémique et simulation dynamique avec SEDIVER pour la conception réglée de systèmes fourragers.

5.2. Une démarche articulant diagnostic et simulation de systèmes fourragers pour évaluer et améliorer l'efficience d'utilisation de l'herbe

G. Martin[1,2,*], J.P. Theau[1], O. Therond[1], J. Carre[1], P. Cruz[1], C. Jouany[1], M.A. Magne[1], M. Duru[1]

[1]: INRA, UMR 1248 AGIR, F-31326 Castanet Tolosan, France

[2]: INRA, UR 875 UBIA, F-31326 Castanet Tolosan, France

[*]: guillaume.martin@toulouse.inra.fr, Tél. : + 33 5 61 28 54 75, Fax : + 33 5 61 73 55 37

Mise en situation

Les systèmes fourragers herbagers se révèlent particulièrement complexes à gérer et sensibles aux variations météorologiques. Des outils récemment développés permettent d'établir des diagnostics de pratiques d'éleveurs qui conduisent à des recommandations de gestion des prairies, par exemple pour améliorer l'efficience d'utilisation de l'herbe. Se pose la question de savoir quelle part de ces recommandations est applicable lorsque l'on intègre les contraintes rencontrées par l'éleveur à l'échelle du système. Cette évaluation systémique par simulation pour deux systèmes bovins allaitants Pyrénéens est l'objet de cet article.

Résumé

Une démarche combinant suivi d'élevages, analyse fonctionnelle du système fourrager, diagnostic de pratiques d'éleveurs, modélisation systémique et simulation dynamique a été mise en place afin de comparer les marges d'amélioration sur l'efficience d'utilisation de l'herbe déterminées à l'échelle de la parcelle dans le diagnostic, et celles apparues atteignables à l'échelle du système dans les simulations. Le diagnostic laisse entrevoir d'importantes marges d'amélioration dans les deux systèmes, en particulier en modifiant l'organisation des récoltes de fourrages. La simulation révèle que ces marges d'amélioration sont en fait très limitées par le poids des contraintes structurelles et climatiques qui ne permettent pas la mise en œuvre parfaite des recommandations de gestion des prairies issues du diagnostic. La démarche proposée constitue un exemple original d'articulation de méthodes capables de supporter l'expertise des chercheurs, des conseillers agricoles et des éleveurs.

Mots-clés :

système herbager / système fourrager / suivis d'élevage / analyse fonctionnelle / diagnostic / modélisation / simulation / comportement gestionnaire / outils de gestion

5.2.1. Introduction

Les systèmes fourragers situés dans les zones herbagères de montagne, pour lesquels l'alimentation du troupeau est basée sur des prairies permanentes riches en espèces, sont particulièrement complexes à gérer. Alors que les besoins alimentaires du troupeau sont continus et assez réguliers, la production d'herbe des prairies est très hétérogène dans l'espace et dans le temps. Cette hétérogénéité est le résultat de différences de types de prairies, de sols, ou de microclimats entre les parcelles. Au gré des conditions, en particulier, météorologiques, les éleveurs essaient d'adapter au mieux leurs pratiques pour assurer l'alimentation du troupeau compte tenu des disponibilités escomptées et observées de l'herbe et des stocks fourragers. Afin de garantir la viabilité, la robustesse et l'adaptabilité de ces systèmes fourragers, il est nécessaire d'améliorer les connaissances disponibles sur les dynamiques des prairies, les pratiques des éleveurs et leurs interactions pour identifier des pistes d'amélioration de l'efficience d'utilisation de l'herbe.

Jusqu'à la fin du siècle dernier, les connaissances génériques destinées à améliorer l'efficience d'utilisation de l'herbe portaient sur les prairies monospécifiques semées. Pour les prairies permanentes riches en espèces, seules des connaissances empiriques étaient disponibles (Daget et Poissonet, 1971 ; Plantureux et al., 1992). Leur domaine de validité hors de leur région de définition faisait débat. Depuis une dizaine d'années, une nouvelle génération d'outils pour la gestion des systèmes fourragers herbagers a vu le jour. Leur particularité est qu'ils dépassent les limites entrevues avec la précédente génération d'outils. Les indices de nutrition minérale appliqués aux prairies riches en espèces (Duru et al., 1997 ; Jouany et al., 2004) en sont un exemple. La caractérisation fonctionnelle de la végétation des prairies, qui fournit les éléments clés de détermination de ses caractéristiques agronomiques (Cruz et al., 2002), en est un autre. Elle a abouti à l'identification de types fonctionnels de graminées (Ansquer et al., 2004), à partir desquels il est possible de connaître la phénologie des espèces végétales, et d'en déduire la dynamique de l'état quantitatif et qualitatif de la communauté végétale correspondante (Ansquer et al., 2008 ; Duru et al., 2007).

La nouvelle génération d'outils pour la gestion des systèmes fourragers herbagers permet d'établir des diagnostics très intégrés qui conduisent à des recommandations de gestion des prairies (Chazelas et Theau, 2008 ; Duru et Delaby, 2003 ; Theau et al., 1998). Si ces outils s'avèrent particulièrement intéressants pour identifier des marges d'amélioration sur l'efficience d'utilisation de l'herbe, l'une de leurs principales limites est qu'ils ont été conçus pour être appliqués à l'échelle de la parcelle. Se pose alors la question de savoir quelle part de ces recommandations est applicable, et ainsi quelle part de ces marges d'amélioration est atteignable lorsque l'on intègre les contraintes rencontrées par l'éleveur au quotidien à l'échelle de la sole pâturée ou fauchée ou du système. Il s'agit par exemple de contraintes sur

la coordination dans l'espace et le temps de l'utilisation des ressources (main d'œuvre et matériel agricole) ou des prairies. La simulation dynamique à l'échelle de l'exploitation agricole permet d'intégrer ces contraintes et de conduire cette évaluation systémique. C'est l'objet de cet article au travers d'une étude conduite sur deux systèmes bovins allaitants orientés vers la production de broutards dans les Pyrénées.

5.2.2. Démarche de recherche

5.2.2.1. Vue d'ensemble

Une démarche combinant suivi d'élevages, analyse fonctionnelle du système fourrager, diagnostic de pratiques d'éleveurs, modélisation systémique et simulation dynamique a été mise en place afin de comparer les marges d'amélioration sur l'efficience d'utilisation de l'herbe déterminées à l'échelle de la parcelle dans le diagnostic et celles apparues atteignables à l'échelle du système dans des simulations. Une analyse fonctionnelle des deux systèmes fourragers étudiés a été effectuée, s'appuyant sur une analyse des pratiques fourragères selon la méthode proposée par Guérin et Bellon (1990) et Bellon et al. (1999), enrichie par une analyse fonctionnelle des végétations basée sur la typologie fonctionnelle des graminées proposée par Ansquer et al. (2004). Cette analyse, discutée et validée par les deux éleveurs suivis, a servi de support à un diagnostic des marges d'amélioration supposées atteignables à l'échelle de la parcelle (Theau et al., 1998), et à une analyse par modélisation systémique et simulation dynamique des marges d'amélioration apparues atteignables à l'échelle du système s'appuyant sur Martin et al. (2009c). Les marges d'amélioration issues des deux approches ont ensuite été comparées.

5.2.2.2. Dispositif de suivi des deux systèmes

Les deux systèmes étudiés, situés entre 615 et 1200 m d'altitude dans la commune d'Ercé (09), se rapprochent du cas type « Naisseur de broutards en montagne Pyrénées » (Institut de l'Elevage, 2006) (Tab. 9). Ces deux systèmes ont fait l'objet d'un suivi pluriannuel (1997-2000) déjà partiellement présenté dans Theau et al. (1998). Les informations suivantes ont été collectées au cours de ce suivi :

- un cadrage général du projet de production de l'éleveur : types et saisonnalité des produits, stocks réalisés, autonomie fourragère ;
- une description des prairies utilisées : surface, altitude, exposition, pente, profondeur de sol, indice de nutrition minérale (selon Duru et al., 1997 et Jouany et al., 2004), caractérisation fonctionnelle de la végétation (selon Ansquer et al., 2004) ;
- une description du troupeau : effectifs, renouvellement, vêlages, allotement, conduite de l'alimentation ;

- un calendrier d'utilisation des prairies prévisionnel et réalisé, avec les modes d'utilisation correspondants (pâturage, fauche, fertilisation), éventuellement complétés de mesures, e.g. des hauteurs d'herbe résiduelles au pâturage ou des rendements à la fauche, et la justification des ajustements réalisés par rapport au calendrier prévisionnel ;
- une évaluation de l'état des stocks fourragers en grange en entrée et en sortie d'hiver, et des achats de stocks passés chaque année ;
- des données météorologiques journalières (températures, précipitations, rayonnement incident, etc.).

Ces deux systèmes ont été choisis parce qu'ils présentaient des niveaux d'autonomie fourragère différents, résultats d'un équilibre contrasté entre récolte et besoins en fourrages (Tab. 9). Toutefois, un niveau d'autonomie fourragère supérieur ne signifie pas pour le système concerné qu'il dispose d'une marge d'amélioration sur l'efficience d'utilisation de l'herbe plus faible que le système pris pour référence. En effet, cette marge est fortement dépendante du poids des contraintes topographiques (pente, altitude, etc.) ou topologiques (distance de la parcelle à l'étable, etc.) du parcellaire et de la disponibilité des ressources, principalement la main d'œuvre et le matériel agricole, qui contraignent la nature et la date d'utilisation des prairies. Or, ces deux systèmes se différenciaient par la proportion de surface de fond de vallée qui est aussi la surface la plus facilement fauchable et la plus productive (Tab. 9).

Tableau 9 : Principales caractéristiques du cas type (CT) et des deux systèmes suivis (CC, MF).

Elevage	Nombre de vaches	Nombre d'UGB	Surface totale hors estive (ha)	Chargement (UGB/ha SFP corrigé de l'estive)	Surfaces de fond de vallée (%)	Surface fauchée (%)	Récolte de fourrages (tMS/UGB)	Besoins en fourrages (tMS/UGB)	Récolte / Besoins
CT	50	58	60	0,73	42	42	1,93	1,82	1,06
CC	38	42	70	0,59	33	51	2,25	2,27	0,99
MF	30	34	41,5	0,78	41	51	1,67	1,90	0,88

5.2.2.3. Analyse fonctionnelle des deux systèmes

L'analyse fonctionnelle a conduit, en premier lieu, à identifier les ruptures dans la façon qu'ont les éleveurs de gérer leur système à l'échelle d'une année, par exemple par la prise en compte d'objectifs différents, ou par la modification de l'alimentation des herbivores. C'est à partir de ces éléments que l'année a été découpée en saisons-pratiques, c'est-à-dire des périodes durant lesquelles les éleveurs mobilisent des fourrages comparables pour alimenter les herbivores (Bellon et al., 1999). Alors que ces auteurs s'appuyaient sur des connaissances empiriques pour distinguer ces types de fourrages, dans ce travail, l'identification des

différents types de végétations entre saisons-pratiques est basée sur une analyse fonctionnelle de la végétation (Ansquer et al., 2004). Une hiérarchie entre ces saisons-pratiques a également été déduite des objectifs assignés à chacune d'entre elles. Cette analyse a permis de mieux comprendre l'enchaînement de ces saisons-pratiques, et d'identifier les sécurités mises en œuvre (Bellon et al., 1999). Ces sécurités permettent aux éleveurs d'adapter la réalisation planifiée des pratiques en tenant compte des effets escomptés et observés de ces pratiques, des états escomptés et observés du système. En effet, s'appuyant sur une analyse réflexive de leurs échecs et réussites passés, les éleveurs planifient leurs pratiques dans le temps et l'espace puis coordonnent dynamiquement leur réalisation, en anticipant les futurs possibles, ou en réagissant à un état présent (Cros et al., 2004). Cette analyse a donc également conduit à formaliser les relations entre les différentes pratiques de l'éleveur au sein des saisons-pratiques ou entre saisons-pratiques, par exemple des précédences (A avant B), des concurrences (A ou B), ou des conjonctions (A avec B). Enfin, cette analyse a permis de caractériser un plan flexible, c'est-à-dire une représentation logique et ordonnée dans le temps et l'espace des pratiques de l'éleveur pour une diversité de conditions de production, météorologiques en particulier, et des processus décisionnels inducteurs de ces pratiques.

5.2.2.4. Diagnostic des pratiques fourragères des éleveurs

Un diagnostic des pratiques a pour vocation de déterminer l'adéquation entre les pratiques et le potentiel productif des prairies utilisées ou la fonction qui leur est assignée. La caractérisation fonctionnelle des prairies permet de déduire entre autres la vitesse de croissance de l'herbe, la quantité de biomasse accumulée, et sa valeur nutritive à partir des connaissances qu'elle fournit sur la phénologie des espèces végétales d'une communauté (Cruz et al., 2002). Les pratiques de l'éleveur peuvent donc être ré-analysées à la lumière de ces connaissances, afin d'évaluer dans quelle mesure de meilleurs compromis entre quantité et qualité ou une efficience d'utilisation de l'herbe supérieure pourraient être atteints. Par exemple, la caractérisation fonctionnelle des prairies permet de connaître la date (en sommes de températures) du stade « épi à 10 cm », et ainsi de repenser l'intérêt, en fonction des objectifs de production, du déprimage et de l'étêtage dans la gestion du pâturage et de la fauche (Chazelas et Theau, 2008). En effet, au contraire du déprimage, l'étêtage permet de contrôler la flambée de la croissance reproductrice de printemps mais il pénalise les quantités de biomasse récoltables ultérieurement. Sur la base d'un diagnostic, des recommandations de pratiques alternatives peuvent donc être suggérées pour améliorer l'efficience d'utilisation de l'herbe.

5.2.2.5. Modélisation systémique et Simulation dynamique

Le modèle de simulation SEDIVER (Martin et al., 2009c) reproduit par simulation les variations quotidiennes de la disponibilité en fourrages sur pied ou conservés, et des effectifs d'animaux et leurs résultats de production (lait et viande), pour différentes conditions de production par exemple climatiques, et différentes structures d'exploitation et/ou comportements gestionnaires d'éleveurs représentés par des plans flexibles. Les informations issues de l'analyse fonctionnelle ont permis d'instancier SEDIVER. Ce modèle applicable aux systèmes herbagers de bovins allaitants a été particularisé à chacun des deux systèmes étudiés. Le modèle de simulation instancié a ensuite été utilisé pour l'analyse par simulation dynamique du comportement de ces systèmes pour différentes séries climatiques.

Le comportement simulé de chacun des deux systèmes a été confronté au fonctionnement observé sur la période de suivi. Il est impossible d'évaluer de manière exhaustive le comportement simulé d'un système à l'échelle de l'exploitation agricole, et à une granularité aussi fine que celle de SEDIVER. Les mesures et observations à comparer aux données simulées sont toujours insuffisantes. Une évaluation par l'usage, basée sur l'expertise et le bon sens agronomique, a permis de vérifier que le modèle instancié conduisait à un comportement simulé réaliste et cohérent par rapport au système observé, et ce, pour les séries climatiques du suivi exploitables (1998, 1999, 2000 car les données météorologiques étaient incomplètes pour l'année 1997) et les années suivantes. Pour ce faire, il a été nécessaire d'examiner plusieurs types de données produites par les simulations : des descripteurs biophysiques d'intérêt (e.g. biomasse d'herbe), des indicateurs dérivés de ces descripteurs utilisés dans la gestion (e.g. hauteur d'herbe dérivée de la biomasse), les date de réalisation des actes techniques (e.g. déplacement des lots d'animaux au pâturage) et des évènements clés (e.g. mise à l'herbe, arrêt des distributions fourragères au printemps) et des indicateurs agrégés à l'échelle du système et d'une année (e.g. part de la pâture dans l'alimentation du troupeau).

Une fois évalué que la particularisation de SEDIVER aux deux cas suivis conduisait à des comportements simulés réalistes et cohérents, des systèmes alternatifs traduisant les recommandations issues du diagnostic ont été conçus, au cours d'une nouvelle phase de modélisation systémique, puis évalués par simulation dynamique. L'évaluation a alors porté sur la faisabilité des recommandations issues du diagnostic, et leurs incidences sur les performances agronomiques et zootechniques, en particulier l'efficience d'utilisation de l'herbe.

5.2.3. Résultats et Discussion

5.2.3.1. Analyse fonctionnelle des deux systèmes

Dans chacun des deux systèmes étudiés, trois types de surfaces peuvent être distinguées : les prairies de fond de vallée, les prairies de versants et les estives. Le circuit de pâturage est organisé dans l'espace selon cette structure du parcellaire (Fig. 23). Cinq saisons-pratiques bornées par les déplacements d'un type de surface à un autre peuvent être distinguées en plus de la période d'hivernage. L'analyse détaillée du déroulement de chaque saison-pratique ne sera pas présentée dans cet article.

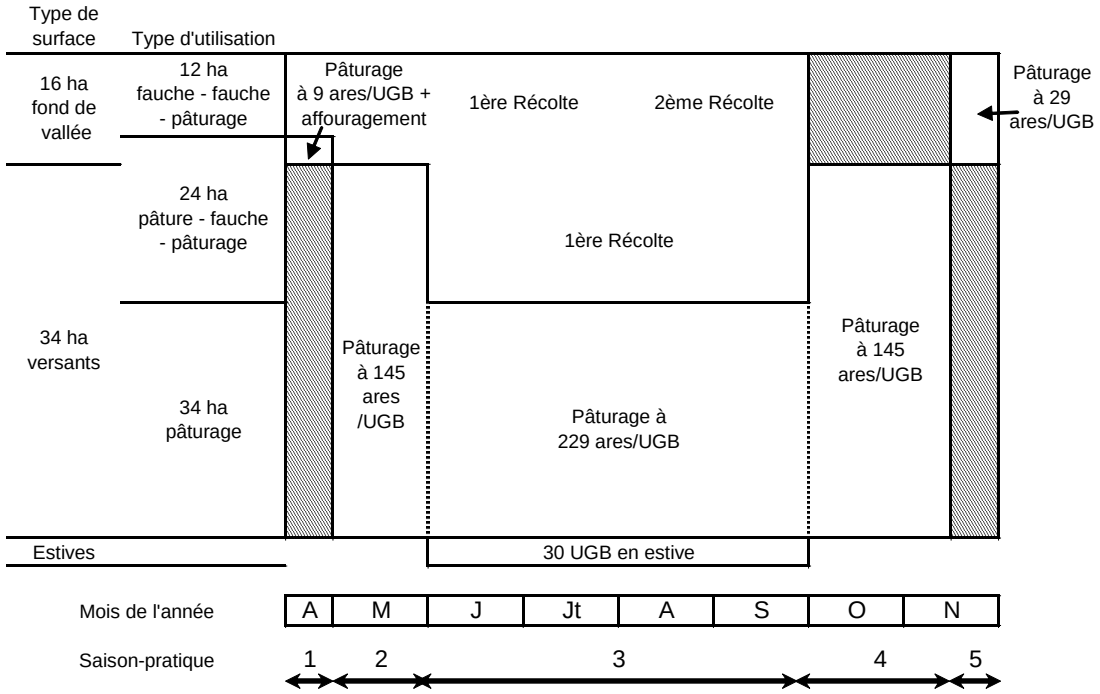


Figure 23 : Représentation schématique du calendrier fourrager de CC. Les saisons-pratiques sont déterminées, à partir de la mise à l'herbe (mi-avril) et au fil de l'année selon le type de surface et le type d'utilisation des prairies. Elles correspondent au début de printemps (1), au plein printemps (2), à l'été (3), l'automne (4), et à la fin de l'automne (5). Les zones hachurées représentent des surfaces non ouvertes au pâturage pour la période concernée. Le calendrier fourrager de MF est proche de celui de CC.

Les enchaînements entre saisons-pratiques se matérialisent par du pâturage de prairies très différentes. En effet, les prairies de fond de vallée, situées entre 615 et 700m d'altitude, se composent de types fonctionnels de graminées A et B (Fig. 24). Les prairies de versants, situées entre 700 et 1200m d'altitude, sont plus diversifiées (Fig. 24). Par conséquent, si l'on conjugue les différences de types de prairies et le gradient altitudinal, la phénologie, qui détermine les dates des stades reproducteurs des graminées, est beaucoup tardive dans les prairies de versants. Par exemple, chez CC, le stade montaison, qui détermine l'entrée en

phase reproductrice des graminées (Gillet, 1980), y survient en moyenne à 867°C.j^{-1} contre 627°C.j^{-1} dans les prairies de fond de vallée. De même, les durées de vie des feuilles qui déterminent, pour une repousse végétative, le moment auquel le pic de production de biomasse est atteint, et ainsi la capacité de la prairie à être récoltée plus ou moins fréquemment (Lemaire, 1999), sont supérieures dans les prairies de versants, e.g. 787°C.j^{-1} contre 657°C.j^{-1} chez CC. Enfin, les estives sont à part, situées au-dessus de 1500m d'altitude et composées de types fonctionnels de graminées C et surtout D.

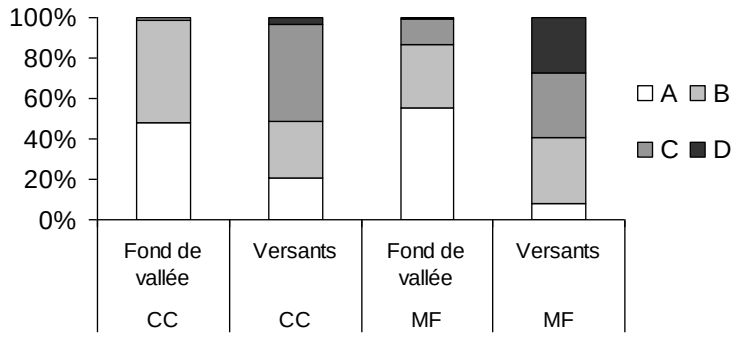


Figure 24 : Répartition des types fonctionnels de graminées A, B, C et D dans les prairies de fond de vallées et les prairies de versants chez CC (gauche) et MF (droite).

5.2.3.2. Diagnostic des pratiques des éleveurs et recommandations d'alternatives

- Début de printemps et plein printemps

Au printemps, durant la phase reproductrice des graminées, la croissance de l'herbe s'accélère nettement. S'il a lieu avant le stade épi à 10 cm, le pâturage de début et de plein printemps ne fait que retarder la récolte et ne supprime pas les épis des graminées. Il s'agit d'un déprimage. Dans le cas contraire, il s'agit d'un étêtage qui arrête la phase reproductrice des graminées, diminue fortement la récolte, mais améliore sa qualité (Gillet, 1980). Dans le cas des deux systèmes herbagers étudiés, la première récolte sert à assurer les quantités stockées. Les éleveurs ne devraient donc avoir recours qu'à du déprimage. Or, sur les prairies qui sont pâturées puis récoltées, près de la moitié des pâturages de début et de plein printemps sont en fait des étêtages (Fig. 25). Selon les éleveurs, une mise à l'herbe plus précoce n'est pas envisageable à cause des risques de gelées ou de chutes de neige. Un départ anticipé sur les prairies de versants ne l'est pas non plus compte tenu des capacités de déplacement limitées des jeunes veaux à la mise à l'herbe. Il serait donc intéressant d'évaluer l'opportunité d'un pâturage de début et de plein printemps sur une surface plus importante, mais avec des hauteurs résiduelles en sortie de prairie plus élevées qui ne conduisent pas à un étêtage.

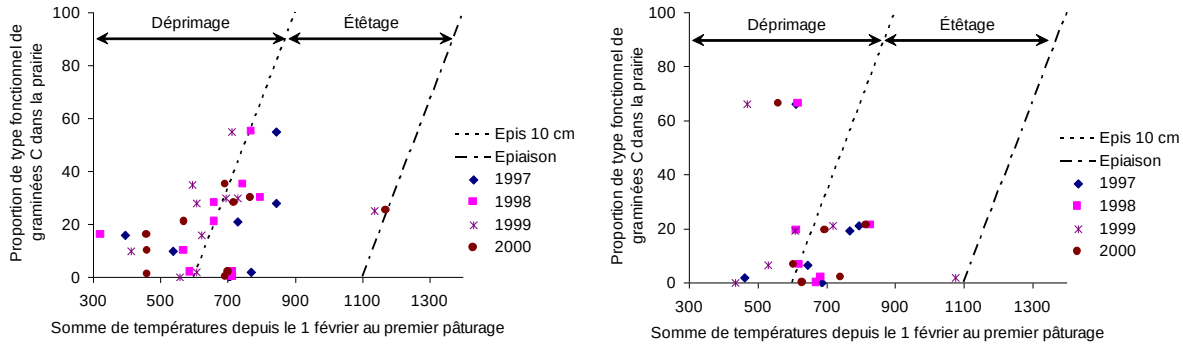


Figure 25 : Distinction entre déprimage et étêtage pour le premier pâturage de début et de plein printemps selon sa date de début (en somme de températures) et la proportion de type fonctionnel de graminées C dans la prairie pour chaque parcelle pâturée au printemps chez CC (gauche) et MF (droite) sur la période 1997-2000.

- Eté

Au delà d'une période correspondant à une durée de vie de feuille, une partie de la biomasse d'herbe pâturable entre en sénescence. La production d'herbe est alors contrebalancée par ces pertes par sénescence, et la digestibilité de l'herbe pâturable s'en trouve diminuée. Chez CC, le pâturage du lot d'animaux sédentarisé durant l'été est peu intensif, avec un chargement très faible et des hauteurs résiduelles en sortie de pâturage élevées, et surtout présente des temps de retour sur chaque prairie élevés, en moyenne de 1144°C.j^{-1}, soit 1,45 durées de vie de feuilles. Certaines parcelles sont même utilisées à l'issue de la phase reproductrice jusqu'à 2500°C.j^{-1}. Aussi, il serait intéressant d'évaluer l'opportunité d'un pâturage d'été rythmé par les cohortes de feuilles en profitant de la souplesse d'utilisation qu'offrent les parcelles de versants, i.e. de l'étalement des stades phénologiques et du risque retardé de pertes de biomasse par sénescence pour les pousses végétatives d'herbe.

- Automne et fin d'automne

Le diagnostic du pâturage d'automne conduit à la même observation que pour l'été. Comme les quatre années de suivi sont marquées par de faibles stress hydriques estivaux, les durées de vie de feuilles calculées correspondent à des successions de cohortes de feuilles et non à des accumulations de températures durant lesquelles la croissance de l'herbe est arrêtée. Le temps de retour après une récolte ou un pâturage sur les parcelles pâturées à l'automne et en fin d'automne est en moyenne de 1202°C.j^{-1} et 1239°C.j^{-1} soit 1,8 et 2,0 durées de vie de feuilles sur les prairies de fond de vallée respectivement chez CC et MF. Or, plus le pâturage d'automne est prolongé, et réalisé sur de l'herbe de qualité, meilleur est son impact sur l'état des stocks en grange et l'état des animaux à l'entrée à l'étable. Il serait donc intéressant, pour ce cas également, d'envisager une date de retour sur ces prairies proche d'une durée de vie de feuilles, éventuellement en élargissant la surface de fond de vallée pâturée pour couvrir

les besoins des animaux sur une période plus longue. Cette suggestion est confortée par le fait que les éleveurs constatent beaucoup de gaspillage d'herbe entre la redescente de l'estive et le retour à l'étable des animaux.

- Récoltes

Toutes les parcelles fauchées sont à dominante de types fonctionnels de graminées A et B. Avec de telles prairies, une première récolte d'herbe éventuellement déprimée, destinée à assurer les stocks fourragers, doit survenir au pic de production d'herbe, peu de temps après la floraison, avant que la croissance ne s'arrête et que de l'herbe récoltable ne se perde par sénescence. Pour la même raison, une première récolte d'herbe préalablement étêtée ou un regain doivent survenir autour d'une durée de vie de feuilles. Or, chez CC comme chez MF, chaque année, plusieurs prairies éventuellement déprimées sont récoltées après la fin du pic de production d'herbe (Fig. 26a). Les prairies étêtées ou récoltées en regains le sont après une durée de vie de feuilles, et le sont jusqu'à plus de deux durées de vie de feuilles (Fig. 26b et 26c). Dans chacun des cas, les récoltes surviennent donc trop tard pour bénéficier du maximum d'herbe récoltable, et aboutissent à un foin et un enrubannage de faible digestibilité. Dans les prairies de fond de vallée, faucher plus tôt au printemps permettrait d'avancer la date des regains et même d'envisager une troisième récolte en fin d'été les années favorables. Pour ce faire, les premières récoltes devraient être déclenchées avant le stade floraison, en ayant recours à plus d'enrubannage lorsque la météo est défavorable. Les regains devraient avoir lieu peu après une durée de vie de feuilles.

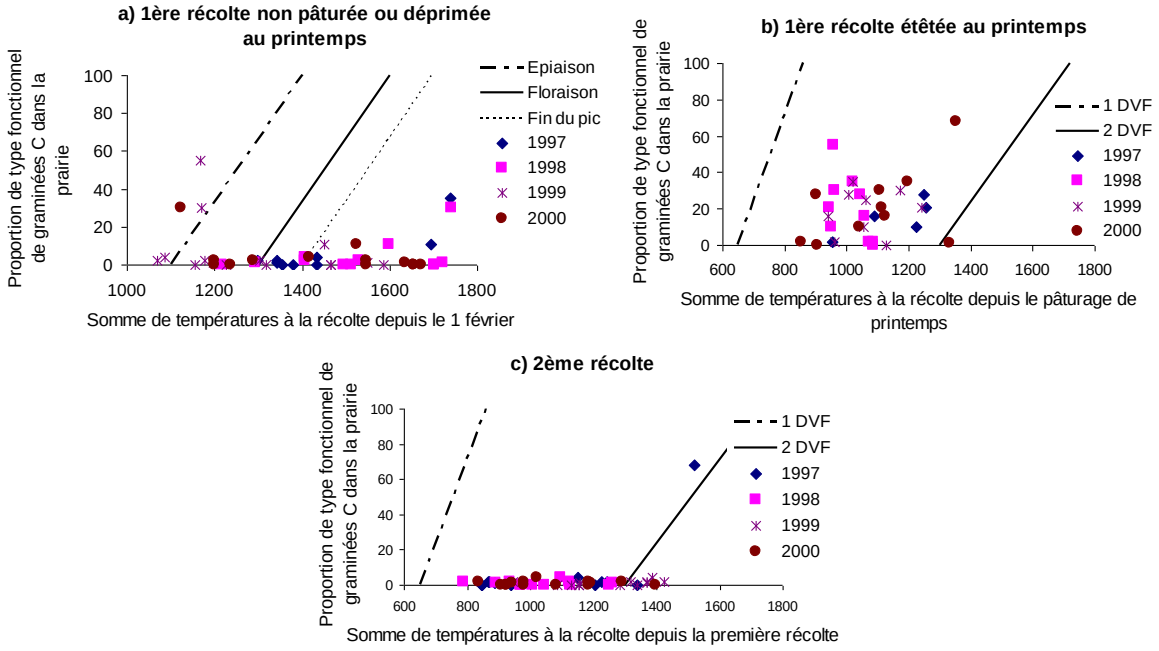


Figure 26 : Caractérisation du stade phénologique auquel surviennent les récoltes selon leur date (en somme de températures) et la proportion de type fonctionnel de graminées C dans la prairie pour chaque parcelle récoltée chez CC sur la période 1997-2000. DVF signifie durée de vie de feuille.

5.2.3.3. Evaluation de la particularisation du modèle de simulation aux deux systèmes

- Capacité du modèle de simulation particularisé à reproduire la diversité des processus biologiques

La simulation fournit une représentation cohérente de la diversité des processus biologiques dans l'espace (ou entre entités, par exemple des catégories d'animaux) et dans le temps. Par exemple, en intégrant les différences de profondeur de sols, de nutrition minérale, d'altitude, et de types de végétations, les quantités récoltées simulées pour chaque parcelle sont voisines des observations en première récolte (chez MF : $R^2 = 0,76$, $P<0,001$, Fig. 27a), mais le sont moins en seconde récolte (chez MF : $R^2 = 0,65$, $P<0,001$). Cependant, si pour les années du suivi, la correspondance entre quantités récoltées observées et simulées est satisfaisante, elle l'est moins pour les années caractérisées par des stress hydriques plus marqués, par exemple l'année 2003. Ces années-là, seule une partie des premières récoltes est effectuée dans les simulations. Pourtant, les éleveurs nous ont confirmé qu'y compris pour l'année 2003, ils avaient pu procéder à des secondes récoltes. Ce problème a de nombreuses origines potentielles : une mauvaise appréciation de la réserve utile en eau du sol, une modélisation inadéquate des processus de croissance ou de sénescence en conditions de stress hydrique, etc. Par conséquent, les résultats présentés par la suite ne portent que sur les années sans stress hydrique marqué pour lesquelles la simulation des processus biologiques est réaliste et cohérente.

Dans les simulations, les quantités de stocks fourragers ingérés par les vaches augmentent à l'approche du vêlage (mi-février) et durant la phase de lactation (mi-février - août) dans des ordres de grandeur correspondant aux références disponibles (Institut de l'Elevage, 2006 ; INRA, 2007). Au printemps, les temps de séjour des animaux au pâturage sont conformes aux observations à un peu plus d'un jour près en moyenne (chez MF : $R^2 = 0,67$, $P<0,001$, Fig. 28a). Les relations et leurs dynamiques introduites dans le modèle entre croissance et sénescence de l'herbe, biomasse d'herbe disponible, hauteur d'herbe, digestibilité et ingestibilité de l'herbe, capacité d'ingestion et ingestion des animaux sont donc cohérentes.

- Capacité du modèle de simulation particularisé à reproduire le comportement gestionnaire des deux éleveurs

La simulation des comportements gestionnaires d'éleveurs fournit une représentation cohérente par rapport aux observations. En effet, les dates des évènements clés dans la gestion du système (mise à l'herbe, retour à l'étable, etc.), c'est-à-dire ceux qui rythment les transitions entre saisons-pratiques, sont simulées, tous lots d'animaux confondus, avec une différence moyenne, par exemple chez CC, d'un peu plus de quatre jours par rapport aux observations conduites. Entre ces évènements, c'est-à-dire au sein des saisons-pratiques, les

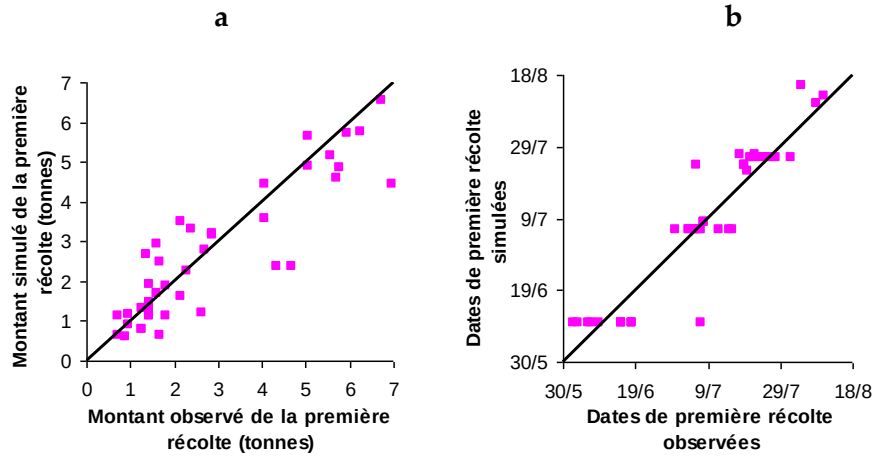


Figure 27 : Correspondance entre observations et simulations pour les quantités récoltées (gauche) et les dates de première récolte sur chaque parcelle récoltée (droite) chez MF pour la période 1998-2000.

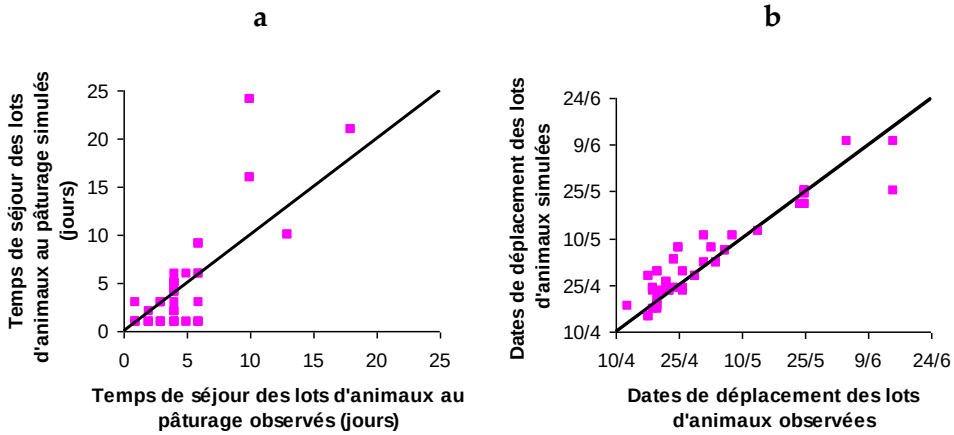


Figure 28 : Correspondance entre observations et simulations pour le temps de séjour des lots d'animaux au pâturage sur les parcelles (gauche) et les dates de déplacement de ces lots d'animaux (droite) chez MF pour la période 1998-2000.

déplacements des lots d'animaux sont simulés au printemps avec une différence moyenne entre les dates simulées et observées de 2 jours chez CC et 3 jours chez MF (R^2 = 0,87, P<0,001, Fig. 28b). Cette correspondance se détériore au fil de l'année mais les enchaînements de déplacements d'animaux restent réalistes et cohérents. Chez MF, la date de réalisation des récoltes est, à 5 jours près en moyenne, conforme aux observations sur les trois années de suivi (R^2 = 0,89, P<0,001, Fig. 27b). La modélisation des processus décisionnels inducteurs des pratiques des deux éleveurs, et les relations entre état du système, prise de décision et réalisation et effets des pratiques sont donc cohérentes.

- Capacité du modèle de simulation particularisé à reproduire les performances annuelles des deux systèmes

Les quantités de fourrages récoltés annuellement sont surestimées de 7% en moyenne chez CC, et sous-estimées de 13% en moyenne chez MF (Tab. 10). La simulation reproduit de manière cohérente la nature (augmentation vs. diminution) et l'ampleur des variations interannuelle des quantités de fourrages récoltés, i.e. en moyenne 19% chez CC et 9% chez MF contre 15% observés chez chacun d'entre eux. Les besoins en stocks fourragers simulés sont inférieurs de 21% en moyenne aux observations chez CC, et sont identiques aux observations chez MF (Tab. 10). Les éleveurs ont souligné la nature plus appétante des fourrages issus de chez MF. Par conséquent, les refus y sont sans doute moins élevés que chez CC. La prise en compte d'un coefficient identique pour les refus, i.e. 10% des quantités distribuées, dans les deux systèmes pourrait donc avoir conduit à sous-estimer les besoins en stocks fourragers chez CC. La part de la pâture dans l'alimentation est, chez CC comme chez MF, inférieure à la valeur de référence issue du cas type (Tab. 10). Il s'agit toutefois d'un ordre de grandeur réaliste puisque le cas type considère une mise à l'herbe plus précoce qu'observée dans les deux systèmes étudiés. Les simulations conduisent à une production brute de viande vive en moyenne de 190 kg/UGB et 173 kg/UGB chez CC et MF, contre 218 kg/UGB pour le cas type (Tab. 10). Cette différence s'explique pour partie par le fait que le cas type considère des concentrés dans la ration des animaux, ce qui n'est pas le cas des deux systèmes suivis. Par rapport aux observations et aux références disponibles, le modèle de simulation particularisé à chacun des deux systèmes fournit donc une représentation cohérente des performances de ces systèmes pour les années sans stress hydrique marqué.

Tableau 10 : Valeurs minimum, moyennes et maximum des principaux indicateurs agrégés de performance des systèmes étudiés pour la période 1998-2000. Les valeurs observées suivies d'un astérisque proviennent du cas type, les autres ont été mesurées et validées par les éleveurs.

Eleveur	Données	Récolte de fourrages (tMS)	Besoins en fourrages (tMS)	Part de la pâture dans l'alimentation (%)	Production brute de viande vive (kg / UGB)
CC	Observées	92,1-109,2-124,4	111,8-114,3-117,0	63*	218*
	Simulées	104,0-117,2-143,5	82,3-94,1-100,0	59-59-60	181-190-200
MF	Observées	52,5-62,9-69,8	61,3-67,3-74,3	63*	218*
	Simulées	51,7-55,6-61,0	65,5-67,3-69,1	58-60-62	170-173-175

5.2.3.4. Evaluation par simulation des systèmes alternatifs traduisant les recommandations issues du diagnostic

Parmi les recommandations issues du diagnostic, l'une d'entre elles, i.e. un pâturage de début et de plein printemps moins intensif sur une surface plus importante, ne pouvait pas

être évaluée avec la version courante de SEDIVER. En, effet, la représentation des conséquences d'un pâturage y est insuffisamment détaillée pour distinguer un déprimage peu intensif d'un étêtage. Les systèmes modifiés évalués par simulation incluent uniquement les recommandations pour l'été, l'automne, la fin d'automne et les récoltes.

Les résultats de simulation montrent, pour les systèmes modifiés, des performances annuelles très voisines voire identiques aux systèmes actuels pour l'ensemble des indicateurs de performances à l'exception de la digestibilité moyenne des fourrages récoltés (Tab. 11). En effet, l'impact relatif des modifications sur les autres indicateurs est inférieur à 5% et peut être considéré comme non significatif. La variabilité interannuelle simulée des indicateurs de performance est également très proche pour les systèmes actuels et modifiés. Avec le système modifié, la digestibilité des fourrages récoltés augmente en moyenne de 0,06 $kg.kg^{-1}$ et 0,10 $kg.kg^{-1}$ chez CC et MF. Cette augmentation de la digestibilité se répercute sur l'ingestibilité de ces fourrages. Or si l'ingestibilité et donc les quantités ingérées quotidiennement par les animaux augmentent alors que les stocks fourragers sont constants, l'autonomie fourragère diminue. Cette conclusion conforte donc l'orientation actuelle des éleveurs vers la production de fourrages grossiers et une organisation du travail plus simple que dans les systèmes alternatifs.

Tableau 11 : Valeurs minimum, moyennes et maximum des principaux indicateurs agrégés de performance des systèmes étudiés pour le système actuel et le système incluant les recommandations issues du diagnostic. Les simulations ont été effectuées pour les années 1998, 1999, 2000 et 2002.

Eleveur	Système	Récolte de fourrages (tMS / UGB)	Besoins en fourrages (tMS/UGB)	Digestibilité des fourrages récoltés ($kg.kg^{-1}$)	Part de la pâture dans l'alimentation (%)	Efficience d'utilisation de l'herbe (%)	Production brute de viande vive (kg / UGB)
	Actuel	1,87-2,39-2,95	2,21-2,62-2,94	0,60-0,61-0,63	59-59-60	48-51-56	181-191-200
CC	Modifié	1,72-2,30-2,82	2,27-2,58-2,95	0,65-0,67-0,69	58-59-61	49-53-56	179-194-201
	Actuel	1,11-1,34-1,56	1,67-1,71-1,76	0,58-0,63-0,65	58-60-62	72-74-76	168-171-175
MF	Modifié	1,30-1,40-1,58	1,74-1,77-1,81	0,71-0,72-0,74	58-59-60	69-74-77	169-171-172

La première récolte sur les prairies de fond de vallée non pâturées au printemps survient chez CC entre 880°C.j^{-1} et 1230°C.j^{-1}. Compte tenu de la surface à faucher, de la vitesse d'avancement des chantiers de récolte et du risque accru de pluies à cette période, il est nécessaire de débuter les premières récoltes dés 880°C.j^{-1} soit la mi-mai, ce qui conduit à procéder aux deuxièmes et troisièmes récoltes lorsque les repousses sont âgées de 700°C.j^{-1} à 1050°C.j^{-1} et de 660°C.j^{-1} à 930°C.j^{-1}. Les prairies de versant pâturées au printemps sont récoltées lorsque les repousses sont âgées de 770°C.j^{-1} à 1220°C.j^{-1}. Les fauches sont donc réalisées plus proches des repères phénologiques considérés optimums tels qu'une durée de vie de feuilles pour les deuxièmes et troisièmes récoltes. Les contraintes sur la disponibilité

des ressources (main d'œuvre, matériel agricole) ou d'ordre climatique ne permettent toutefois pas, y compris en repensant l'ordre de réalisation des récoltes pour bénéficier des durées de vie de feuilles plus longues, de s'approcher plus encore de ces repères phénologiques pour ainsi limiter les pertes par sénescence de biomasse d'herbe récoltable. C'est l'une des raisons pour lesquelles les quantités de stocks fourragers récoltées annuellement avec les systèmes modifiés ne sont pas très différentes de celles obtenues avec les systèmes actuels.

Les modifications de la gestion du pâturage d'été et d'automne ont un effet bénéfique sur la digestibilité de l'herbe pâturée. Ces gains en digestibilité de l'herbe se répercutent sur l'ingestion des animaux, et sur leurs performances. C'est ainsi que chez CC, le lot d'animaux n'estivant pas rentre à l'étable avec une note d'état supérieure de 0,10 point en moyenne avec le système modifié. Le lot d'animaux qui estivent en bénéficie également à l'automne et rentre à l'étable avec une note d'état supérieure de 0,04 point en moyenne.

5.2.4. Conclusions

5.2.4.1. Des marges d'amélioration limitées pour les deux systèmes

Déjà en 1998, Theau et al. suggéraient, à l'issue d'un diagnostic, que des marges d'amélioration étaient envisageables dans les deux systèmes étudiés pour améliorer leur autonomie fourragère, notamment en avançant les dates des récoltes. Ils en appelaient alors à une évaluation par simulation de la faisabilité de ces recommandations. Il s'avère, après avoir conduit cette évaluation, que les marges d'amélioration issues d'un avancement des dates de récoltes sont très limitées. Les contraintes structurelles (proportion de surfaces de fond de vallée, main d'œuvre disponible, etc.) et climatiques sont telles, que les pratiques alternatives issues du diagnostic, supposées conduire à une efficience d'utilisation de l'herbe plus élevée et donc à des quantités de fourrages récoltés supérieures, ne s'avèrent pas applicables dans les fenêtres temporelles pour lesquelles les pertes de biomasse d'herbe récoltable et de digestibilité de l'herbe sont limitées. C'est d'ailleurs ces mêmes contraintes qui poussent les éleveurs à étêter une partie de leurs prés de fauche. C'est probablement dans l'identification de nouveaux modes de gestion qui évitent cet étêtage que réside la plus grande marge d'amélioration des quantités de stocks fourragers récoltés annuellement. En effet, la cinétique de la production d'herbe va jusqu'à tripler durant la phase reproductrice (Duru et al., 2009a). Chez CC par exemple, deux tiers de la surface récoltée est pâturée au printemps, et les étêtages sont fréquents. Enfin, une valorisation plus importante du potentiel de production des prairies de fond de vallée constitue une autre marge d'amélioration. Par exemple, chez CC, l'indice de nutrition minérale moyen pondéré par la surface y est de 0,70, ce qui laisse place à un accroissement de la production d'herbe via des

pratiques de fertilisation plus intensives.

5.2.4.2. Une démarche originale pour l'analyse et la conception de systèmes fourragers herbagers

Cette étude articule, dans une démarche originale, suivi d'élevages, analyse fonctionnelle du système fourrager, diagnostic de pratiques d'éleveurs, modélisation systémique et simulation dynamique. Chacune de ces approches s'appuie sur des bases scientifiques avérées et génériques, c'est-à-dire qui sont « décontextualisables » du cadre de cette étude. Par exemple, la pertinence de la typologie fonctionnelle des graminées a déjà été démontrée dans plusieurs autres régions (Limousin, Massif Central, Brésil, etc.). C'est ainsi que la combinaison de deux approches fonctionnelles, pour l'analyse des pratiques fourragères (Bellon et al., 1999) et des végétations (Ansquer et al., 2004), en fait une méthode non empirique et généralisable d'analyse des systèmes fourragers. De même, le modèle de simulation SEDIVER s'appuie sur un cadre générique pour la modélisation et la simulation de systèmes agricoles qui a déjà été appliquée à l'élevage, à la vigne ou aux grandes cultures. Y compris pour les cultures, la plupart des démarches existantes s'appuient sur deux des méthodes précitées, par exemple suivi et diagnostic, et ne s'appliquent qu'à l'échelle de la parcelle. Il s'agit ici de l'un des premiers exemples de démarche qui combine et articule l'ensemble de ces méthodes dans un continuum cohérent pour l'analyse et la conception de systèmes agricoles.

Les résultats obtenus pour ces deux cas ont remis en cause des valeurs directrices qui guidaient certains de nos travaux. La simulation nous a révélé que des adaptations qui nous semblaient réalistes sur la base des diagnostics réalisés à l'échelle de la parcelle ne l'étaient pas, à l'échelle du système, lorsque l'on prend en compte les contraintes structurelles et climatiques rencontrées au quotidien par les éleveurs. Ainsi, parce qu'elle est pertinente pour traiter des questions opérationnelles de gestion des systèmes fourragers, la démarche proposée doit permettre d'alimenter les discussions avec les conseillers agricoles et les éleveurs, et d'envisager la conception de systèmes fourragers herbagers innovants qui est rendue nécessaire par les nouveaux enjeux entourant l'élevage : changement climatique, volatilité des prix des produits, etc. A l'heure actuelle, si les méthodes d'analyse fonctionnelle du système fourrager et de diagnostic sont promues et diffusées dans le cadre de dispositifs de formation des conseillers agricoles, l'utilisation du modèle de simulation SEDIVER est complexe à mettre en œuvre et reste cantonnée à notre équipe de recherche. Il est toutefois envisagé que SEDIVER soit utilisé dans des ateliers de conception de systèmes fourragers herbagers innovants organisés avec des experts de différentes natures (chercheurs, conseillers agricoles, éleveurs, etc.).

Remerciements

Cette recherche a pu être réalisée grâce aux soutiens des projets ANR ADD TRANS (TRANSformations de l'élevage et dynamiques des espaces, ANR-05-PADD-003) et ANR VMC VALIDATE (Vulnerability Assessment of LIvestock and grasslanDs to climAte change and exTreme Events, ANR-07-VULN-011). Nous souhaitons remercier tout particulièrement les éleveurs d'Ercé ayant participé à ce travail pour leur riche collaboration. Nous remercions également Roger Martin-Clouaire et Jean-Pierre Rellier pour leur contribution au développement du modèle de simulation SEDIVER.

6. Discussion générale

6.1. Bilan du travail réalisé dans ce projet de thèse

L'objectif de cette thèse était de proposer une démarche de modélisation systémique et de simulation dynamique destinée à faciliter l'analyse de systèmes fourragers herbagers et la conception réglée de systèmes fourragers flexibles, valorisant la diversité biologique végétale et animale, et du territoire d'exploitation. La conception réglée a pour objectif d'améliorer les systèmes existants pour qu'ils satisfassent de nouveaux objectifs clairement identifiés, par exemple une meilleure utilisation des ressources biologiques du système. Elle mobilise des compétences et des connaissances qui sont en général disponibles dans la recherche, ou peuvent faire l'objet d'un partenariat avec des organismes de développement. La conception innovante, s'applique aux situations pour lesquelles les objectifs de la conception restent plus flous du fait de la prise en compte de nouveaux objectifs autour desquels peu de compétences et de connaissances sont disponibles. La thèse défendue était que l'analyse de systèmes fourragers herbagers et la conception réglée de systèmes fourragers flexibles réalistes requièrent de modéliser à un niveau d'abstraction approprié la diversité fonctionnelle végétale et animale, et du territoire d'exploitation, ainsi que les comportements de gestionnaires. Par approprié, nous entendions un niveau d'abstraction qui tienne compte des connaissances disponibles, de la question d'intérêt, et du type de support informatique disponible. La question portait donc sur les connaissances à intégrer et la manière de les intégrer dans cette démarche de modélisation systémique et de simulation dynamique.

Les Chapitres 3 et 4 ont présenté :

- le développement du modèle de simulation SEDIVER qui est au cœur de la démarche proposée, c'est-à-dire l'analyse du système d'intérêt, sa modélisation conceptuelle puis son implémentation informatique ;
- les approfondissements sur le système fourrager nécessités par son développement ;
- une application à l'analyse et à la conception d'un système fourrager plus flexible que celui observé, valorisant la diversité fonctionnelle végétale et animale, et du territoire d'exploitation par un comportement de gestionnaire adapté de l'éleveur.

Par conséquent, ces Chapitres 3 et 4 ont satisfait l'objectif énoncé, ont apporté une réponse à la question posée et ont discuté la démarche de modélisation systémique et de simulation dynamique ainsi développée. Le Chapitre 5 a montré dans quelle mesure cette démarche constitue un complément intéressant à d'autres approches de conception de systèmes fourragers, dans ce cas le diagnostic de pratiques d'éleveurs, pour conforter ou remettre en cause l'expertise des conseillers agricoles et des chercheurs sur la façon qu'ont les éleveurs

de gérer leurs systèmes, et pour accompagner les éleveurs vers de nouvelles façons de les gérer.

Il est possible d'affirmer qu'une thèse est confirmée que si l'on ne peut l'invalider. Dans le cas présent, et comme pour la plupart des projets de thèse dont l'objectif est le développement d'un nouveau modèle de simulation ou d'une nouvelle démarche de modélisation et simulation, la thèse formulée n'est pas aisément invalidable. La littérature scientifique portant sur ces modèles de simulation et ces démarches appliqués aux systèmes agricoles fournit très peu d'éléments sur leurs lacunes. Ainsi, il est difficile d'identifier avec certitude leur périmètre de compétence et, par conséquent, d'établir l'apport relatif de celui au cœur de ce projet de thèse. En outre, il n'existe pas de méthode pour la comparaison objective de modèles de simulation de systèmes agricoles. De telles méthodes auraient pu permettre d'évaluer les contributions respectives ou les plus-values de ces modèles d'un point de vue conceptuel et informatique, dans leur capacité à faciliter l'analyse et la conception de systèmes agricoles, et à stimuler les échanges entre chercheurs, conseillers agricoles ou éleveurs impliqués dans l'utilisation de tels modèles ou l'analyse de simulations. De par la représentation conjointe de la diversité fonctionnelle végétale et animale, et du territoire d'exploitation, ainsi que des comportements de gestionnaires, au niveau d'abstraction proposé, il est toutefois indéniable que la démarche proposée apporte une contribution à l'analyse et à la conception de systèmes fourragers flexibles, comme illustré dans la Section 5.2. Il reste néanmoins à étudier en profondeur jusqu'où l'extension du réalisme du modèle de simulation peut être poussée sans qu'elle s'accompagne d'une complexification rédhibitoire de l'analyse et de la conception. En l'état actuel des connaissances sur les travaux connexes, et des méthodes disponibles pour une éventuelle comparaison, c'est essentiellement sur cet aspect que peut se construire une réfutation empirique de la thèse. Dans ce cas, puisque la démarche proposée conduit à une complexité « gérable » de l'analyse et de la conception, la thèse énoncée est donc confirmée.

Les sections suivantes discutent quelques apports et limites scientifiques et finalisés de la démarche de modélisation systémique et de simulation dynamique proposée.

6.2. Une démarche de modélisation et de simulation pour conduire des recherches finalisées

6.2.1. Intérêt de la démarche proposée pour la conception réglée de systèmes fourragers

S'interrogeant sur les recherches conduites sur la gestion des systèmes agricoles, Barr et Cary (1992, cités par Ronan, 2002) en appellent à une recherche agronomique orientée

explicitement vers l'identification de solutions pratiques :

> « What is required are profitable and practical conservation farming techniques and management strategies. Where these are not available the best assistance is research directed at producing and promoting practical and profitable solutions, rather than a reliance on evangelical calls to better farming and changing attitudes. »

Pour ce faire, la démarche proposée de modélisation systémique et de simulation dynamique présente plusieurs intérêts pour assister l'analyse et la conception réglée de systèmes fourragers. Pour rester pertinent compte tenu des préoccupations des acteurs, elle est très flexible sur la nature du problème à traiter (e.g. amélioration de l'efficience d'utilisation de l'herbe, changement du type de produits animaux, etc.) ou des modifications à évaluer (e.g. modification du chargement, de la date de vente, de l'allotement, de l'alimentation, etc.) alors que la plupart des modèles de simulation et des démarches sont spécifiques à un problème ou une question (Woodward et al., 2008). Elle permet une modélisation et une simulation explicite et réaliste d'une grande diversité de comportements gestionnaires d'agriculteurs (e.g. anticipatoires vs. réactifs, « cultivateur d'herbe » qui prend ses décisions selon la phénologie des prairies vs. « éleveur boucher » qui les prend selon l'état corporel des animaux, etc.), correspondant à des « farming styles » différents (van der Ploeg, 1994), et ainsi d'évaluer un grand nombre de combinaisons entre configuration du système, planification et coordination d'activités. Ces caractéristiques sont supposées renforcer le caractère remarquable, la crédibilité et l'acceptabilité des alternatives conçues (Keating et McCown, 2001 ; Woodward et al., 2008). Pour rester dans les cadres de références des acteurs, elle permet de modéliser un grand nombre de systèmes car elle repose sur des bases scientifiques génériques, qu'il s'agisse d'aspects biologiques grâce aux types fonctionnels de graminées (Ansquer et al., 2004) par exemple, ou de gestion grâce au modèle de décision issu de l'ontologie des systèmes de production agricole (Martin-Clouaire et Rellier, 2009). Enfin, de par les niveaux d'organisation qu'elle intègre, cette démarche permet d'appréhender la diversité fonctionnelle végétale et animale, et du territoire d'exploitation, des échelles d'espace et de temps variées, et conduit ainsi à pouvoir évaluer l'opportunité d'utiliser cette hétérogénéité comme une variable d'action (Chevassus-au-Louis et al., 2008), pour les propriétés de flexibilité qu'elle confère au système. Il s'agit là d'une propriété essentielle, d'un composant intégral de la perspective théorique sur les systèmes agricoles (Lev et Campbell, 1987), en particulier lorsque l'on se livre à la conception de pratiques ou de systèmes agricoles (Tittonell et al., 2007 ; Zingore et al., 2009).

6.2.2. La conception de systèmes agricoles, lien entre science et pratique

La démarche de modélisation systémique et de simulation dynamique proposée dans cette thèse a été développée pour assister la conception réglée de systèmes fourragers. Dans le

champ de l'écologie du paysage, Nassauer et Opdam (2008) opèrent un positionnement très intéressant de la conception de paysages, à l'interface entre science et pratique :

> « If we include landscape design as part of scientific knowledge creation, we have a common link between the science and practice of landscape change […]. This design link is both a product and an activity. This relationship also can be described as two knowledge creation activities linked by design as the common activity, in which scientists and practitioners work together to create and revise knowledge to guide landscape change. »

Ce positionnement, lorsqu'il est adapté à la conception réglée ou innovante de systèmes agricoles, conserve toute sa pertinence et constitue un cadre fédérateur pour les recherches en ingénierie agroécologique (Fig. 29). En effet, c'est bien les retours de la pratique vers la recherche sur les systèmes conçus qui remettent en cause ou valident les connaissances scientifiques, les cadres d'analyse ou les modèles de simulation disponibles et mobilisés pour la conception, générant ainsi l'identification de lacunes dans les connaissances scientifiques et la formulation de nouvelles questions de recherche. Par exemple, c'est bien la compréhension par les chercheurs, à l'épreuve de la pratique, que les agriculteurs ne sont pas des décideurs parfaitement rationnels, i.e. de ceux qui optimisent l'utilité espérée des décisions, donc qu'ils ne sont pas « optimisateurs de pratiques » pour la mise en œuvre des systèmes conçus, qui a mis en lumière la nécessité d'accroître les considérations pour la flexibilité des systèmes agricoles dans les projets de recherche. C'est donc lorsque les scientifiques sont impliqués dans les applications de leurs connaissances qu'ils sont susceptibles de comprendre comment en améliorer la pertinence, d'identifier de nouveaux problèmes ou de nouvelles solutions pratiques qui requièrent de nouvelles recherches. Dans cette perspective, ce projet de recherche, et plus largement les travaux conjoints ou non des deux équipes de recherche impliquées, sont des exemples riches d'enseignements (voir Duru, 2009 ; Duru et al., 2009c) du champ en émergence que sont les recherches en ingénierie agroécologique. En outre, comme présenté dans le Chapitre 5, la démarche de modélisation

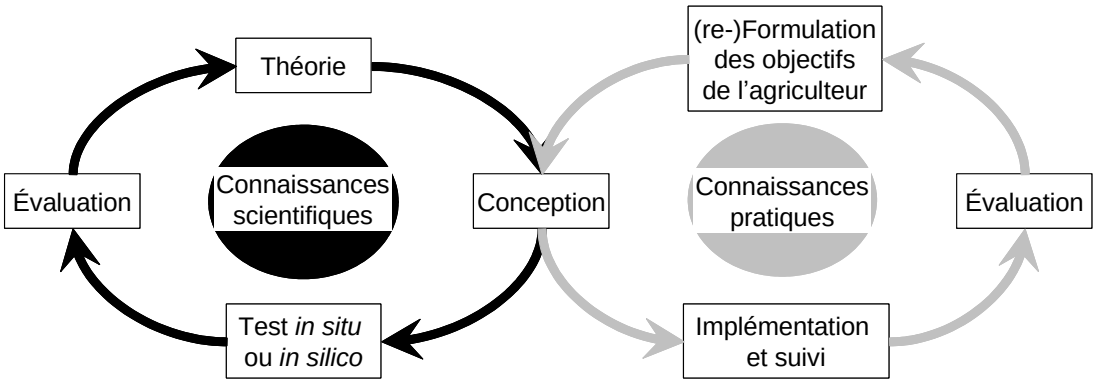


Figure 29 : La conception de systèmes agricoles vue comme le lien entre science et pratique (adapté de Nassauer et Opdam, 2008).

systémique et de simulation dynamique proposée constitue un support intéressant pour organiser une conception de systèmes fourragers qui réinterroge cette démarche, et qui supporte la réflexion et l'expertise des chercheurs, des conseillers agricoles et des éleveurs.

6.2.3. La conception de systèmes agricoles pour renforcer les capacités adaptatives des acteurs

En servant de support à la réflexion et à l'expertise des chercheurs, des conseillers agricoles et des éleveurs, il est attendu de ces démarches de conception assistée par modélisation et simulation qu'elles stimulent l'apprentissage de ces différentes catégories d'acteurs. En effet, elles permettent de distinguer objectivement les éléments factuels des opinions individuelles, de générer des discussions constructives basées sur des arguments illustrables, d'amener de nouveaux points de vue dans des débats parfois polarisés, et d'améliorer la compréhension par les acteurs du comportement des systèmes agricoles (Attonaty et al., 1999 ; Rossing et al., 1997 ; ten Berge et al., 2000).

Parce qu'elles permettent d'expérimenter un grand nombre de combinaisons entre configuration du système, planification et coordination d'activités, ces démarches de conception assistée par modélisation et simulation stimulent l'apprentissage expérimental (Fig. 30). Attonaty et al. (1999) rapportent l'attitude itérative et incrémentale d'agriculteurs, désireux de concevoir et d'évaluer par simulation de nouveaux systèmes jusqu'à atteindre un système qui les satisfasse. La visualisation de systèmes agricoles alternatifs conduit les différentes catégories d'acteurs à s'interroger sur leurs modèles mentaux, i.e. leurs représentations tacites sur et pour la gestion de leurs systèmes, sur leurs actes techniques, et à envisager de nouvelles opportunités qui peuvent possiblement se traduire par des changements dans leurs processus décisionnels et dans leurs actes techniques. Il s'agit donc là d'un élément clé pour renforcer la capacité adaptative de ces acteurs, et amener en particulier les conseillers agricoles et les éleveurs à devenir respectivement des experts adaptatifs (Fazey et al., 2005) et des gestionnaires adaptatifs (Carpenter et al., 2001 ; Darnhofer et al., 2008), c'est-à-dire qui s'adaptent aux changements plutôt qu'à leur conséquences (Lee, 1999). Cela requiert le développement continu, par l'apprentissage, d'un portefeuille de solutions pratiques à des problèmes rapidement mobilisables (Darnhofer et al., 2008).

La mise en œuvre de nouvelles pratiques ou de nouveaux systèmes permet de stimuler un second type d'apprentissage essentiel et complémentaire du premier, l'apprentissage expérientiel (Fazey et al., 2005 ; Leeuwis, 2004) (Fig. 30). En effet, de nouvelles connaissances ne sont pas nécessairement synonymes d'amélioration des performances pour l'éleveur. Proposer un nouveau circuit de pâturage n'est pas suffisant si ce circuit n'a pas été

effectivement mis en œuvre par l'éleveur, et qu'il a satisfait entre autres son organisation du travail. Surtout, cet apprentissage expérientiel doit fournir à l'éleveur les repères clés pour la mise en œuvre effective de ces alternatives, et doit conforter ses capacités d'identification et d'interprétation des changements d'état du système ou de son environnement (Fazey et al., 2005 ; Leeuwis, 2004).

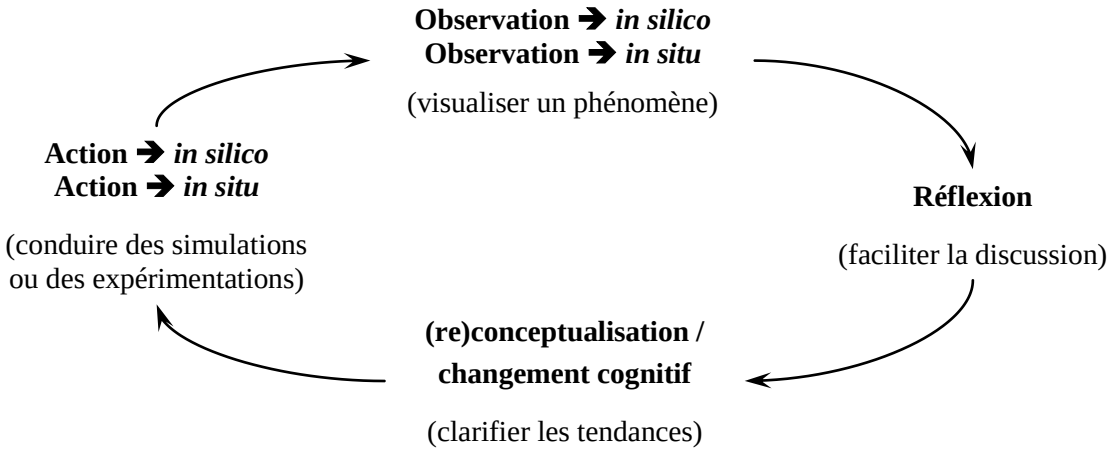


Figure 30 : La boucle de l'apprentissage qui vaut pour l'apprentissage expérimental comme pour l'apprentissage expérientiel. Entre parenthèses, les manières dont les différentes étapes peuvent être facilitées (adapté de Leeuwis, 2004).

Dans le cadre de ce travail, des interactions ont eu lieu avec des conseillers agricoles et des éleveurs. Toutefois, la fréquence de ces interactions et le recul sur leurs pratiques pour y observer d'éventuels changements sont pour l'heure insuffisants pour en tirer des conclusions quant à un éventuel apprentissage. L'intérêt d'une telle démarche de conception assistée par modélisation et simulation pour l'apprentissage des chercheurs est plus évident, comme le montre la Section 5.2., et comme déjà observé dans d'autres projets (Sterk et al., 2007). Grâce au potentiel révélateur de la modélisation systémique et de la simulation dynamique, l'analyse et la conception réglée appliquée à deux cas réels (Section 5.2.) ont conduit à un apprentissage qualifiable de double boucle (Argyris et Schön, 1996). Ce type d'apprentissage survient lorsque les principes, les normes, les hypothèses et les objectifs qui guidaient les pratiques actuelles sont remis en cause et deviennent objet de l'apprentissage. Il s'agit donc, appliqué à ce cas, d'un apprentissage qui a entraîné une remise en cause à l'échelle du système et de sa dynamique sur une année, des hypothèses issues du diagnostic des pratiques de l'éleveur à l'échelle de la parcelle en un instant. Ce type d'apprentissage a provoqué l'abandon de certaines valeurs directrices ou certitudes, par exemple l'idée qu'il existe une marge de progrès importante et facilement atteignable sur les quantités de stocks fourragers récoltés annuellement dans les deux systèmes fourragers. La modélisation et la simulation, de par leur nature systémique et dynamique, ont donc contribué à révéler à quel

point les contraintes rencontrées au quotidien par les éleveurs (e.g. disponibilité du matériel agricole, de la main d'œuvre, concurrence d'utilisation entre parcelles, risques de chutes de neige ou de gelées, etc.) pèsent sur la réalisation dynamique des actes techniques, et ainsi à définir les limites sur les performances des systèmes fourragers atteintes dans un cadre de conception réglée. Précisons toutefois que sur d'autres terrains, les conclusions pourraient être différentes.

La démarche de modélisation systémique et de simulation dynamique proposée dans cette thèse présente pour l'instant trois limites principales qui brident sa capacité à stimuler l'apprentissage. La première concerne le domaine de validité des modèles biophysiques utilisés dans le modèle de simulation SEDIVER. Par exemple, comme indiqué dans la Section 5.2.3.3., les simulations conduites pour des situations de stress hydriques intenses et durables produisent des comportements simulés des systèmes fourragers irréalistes, en particulier le rapport entre croissance et sénescence de l'herbe et donc les productions d'herbe sur chaque parcelle. C'est pourtant pour ces situations non routinières que le potentiel de telles démarches a le plus d'intérêt en termes d'apprentissage.

La deuxième limite concerne l'absence de prise en compte des trajectoires des systèmes agricoles sur le long terme, avec les changements d'organisation qui peuvent y être associés. Il s'agit là pourtant d'une dimension essentielle de la flexibilité d'un système (Dedieu et al., 2008a). Mais cette flexibilité n'a d'intérêt que si elle maintient la cohérence du système sur le long terme. En prenant des décisions stratégiques, les éleveurs essaient donc d'accomplir leurs objectifs sur le court terme et de maintenir une gamme d'options suffisamment large pour pouvoir s'adapter à une diversité d'avenirs (Lev et Campbell, 1987). La prise en compte conjointe de ces deux dimensions est pour l'heure assez rare dans la littérature scientifique agronomique. Cette seconde limite n'est sans doute pas complètement indépendante de la troisième.

La troisième limite, qui est peut-être la principale, regarde la complexité, les moyens et le temps nécessaires pour la mise en œuvre de la démarche de modélisation systémique et de simulation dynamique, i.e. pour disposer des données suffisantes pour analyser un système fourrager, particulariser le modèle de simulation et conduire une expérimentation par simulation qui éventuellement réinterroge les étapes précédentes. Pour disposer d'un jeu de données adéquat, deux options sont possibles : les suivis d'élevages complétés par de l'expertise (cf. Section 5.2.), i.e. des cas singuliers, ou des références techniques comme les cas types complétées par de l'expertise voire des données issues de suivis d'élevage (cf. Section 3.3.). Or, les résultats très différents des deux expérimentations conduites dans ce projet de thèse montrent en quoi ce choix n'est pas trivial. Dans la Section 3.2., à partir des dates des évènements clés mentionnées dans le cas type, par exemple pour la mise à l'herbe, il a été

possible d'identifier et d'évaluer, avec la version courante du modèle de simulation SEDIVER, des stratégies de pâturage qui évitent l'étêtage des prés de fauche, et qui conduisent à pouvoir doubler les quantités de stocks fourragers récoltées annuellement. Or, en étudiant des cas réels qui intègrent les contraintes particulières mentionnées par chaque éleveur, l'identification de stratégies de pâturage qui évitent l'étêtage des prés de fauche, n'a pas été possible avec la version courante de SEDIVER (cf. Section 5.2.), et les résultats sur les quantités de stocks fourragers récoltées annuellement ont été nettement moins spectaculaires. De plus, avec chacune des options, la particularisation du modèle de simulation nécessite l'élicitation de processus décisionnels souvent tacites (Aubry et al., 1998). Cette élicitation est une tâche particulièrement ardue, en particulier pour les décisions prises sous incertitude, souvent objet d'un compromis entre des facteurs de natures très diverses, e.g. performances productives escomptées, organisation du travail, bien-être animal, etc. D'autre part, SEDIVER n'est qu'un outil, réceptacle de connaissances qui lui permettent de fonctionner, sans toutefois qu'il n'en génère directement de nouvelles. SEDIVER ne fait que donner à voir à l'analyste, au travers de séries numériques et de rapports d'exécution, le comportement du système simulé. L'analyste se doit donc ensuite d'interpréter ce comportement, ce qui nécessite une expertise sur le type de système simulé. Or, à l'INRA comme dans le développement agricole, cette expertise est rare ou peu encline à s'investir dans de tels projets (Meynard, 2008), ce qui exclut la conception et l'évaluation de certains systèmes potentiellement intéressants. Ce constat invite, ainsi que le suggéraient déjà Attonaty et al. (1999), à repenser la manière de conduire de telles collaborations, pour en développer de plus fécondes. En effet, lors de telles collaborations, les conditions requises pour stimuler l'apprentissage en s'appuyant sur des modèles de simulation sont encore discutées (McCown, 2002 a ; McCown et al., 2006 ; Sterk et al., 2006 ; Woodward et al., 2008). A ce sujet, les communautés en émergence ayant recours à la modélisation dite participative ou d'accompagnement (e.g. Collectif ComMod, 2006) fournissent des exemples de postures scientifiques originales pour stimuler l'apprentissage.

6.3. Vers la conception de systèmes agricoles en rupture

Dans le cadre de ce projet, la démarche proposée de modélisation systémique et de simulation dynamique n'a été utilisée que pour assister la conception réglée de systèmes fourragers. Les enjeux actuels autour de l'élevage, en particulier le changement climatique, invitent à utiliser cette démarche en conception innovante. Ce devrait être le cas au travers de deux projets en cours et à venir financés par l'Agence Nationale de la Recherche, le projet Vulnérabilité, Milieux et Climat VALIDATE (Vulnérabilité des prairies et des élevages au changement climatique et aux évènements extrêmes), et le projet Systerra 02LA (Organismes et Organisations Localement Adaptés). Comme indiqué précédemment, la conception

innovante, s'apparente plus à une activité de construction de représentations que de résolution de problèmes. Elle s'applique à ces situations pour lesquelles l'apprentissage individuel est insuffisant, nécessitant que les différentes catégories d'acteurs modifient leurs modèles mentaux et leur comportement de manière interactive et en synergie, pour aboutir à une représentation partagée du système et de la question d'intérêt, et à des actions coordonnées et cohérentes. Röling et Wagemakers (1998) qualifient ce processus « d'apprentissage social ». La conception innovante requiert donc des démarches plus ouvertes, pluridisciplinaires, adaptatives et collectives que la conception réglée. La mise en place d'ateliers de co-conception semblables à ceux du Réseau Mixte Technologique Systèmes de culture innovants (Reau et Doré, 2008) devrait y contribuer. Il se pourrait alors que la démarche proposée de modélisation systémique et de simulation dynamique doive être modifiée voire que certains concepts qu'elle mobilise soient remis en cause ou même qu'elle soit jugée inutile car incapable d'intégrer les innovations technologiques, par exemple sur le matériel agricole.

Références bibliographiques

Al Haj Khaled, R., Duru, M., Theau, J.P., Plantureux, S., Cruz, P., 2005. Variation of leaf traits through seasons and N-availability levels and its consequences for ranking grassland species. Journal of Vegetation Science 16, 391-398.

Al Haj Khaled, R., Duru, M., Decruyenaere, V., Jouany, C., Cruz, P., 2006. Using leaf traits to rank native grasses according to their nutritive value. Rangeland Ecology & Management 59, 648-654.

Altieri, M.A. 1999. The ecological role of biodiversity in agroecosystems. Agriculture, Ecosystems & Environment 74, 19-31.

Andrieu, N., Josien, E., Duru, M., 2007a. Relationships between diversity of grassland vegetation, field characteristics and land use management practices assessed at the farm level. Agriculture, Ecosystems & Environment 120, 359-369.

Andrieu, N., Poix, C., Josien, E., Duru, M., 2007b. Simulation of forage management strategies considering farm-level land diversity: Example of dairy farms in the Auvergne. Computers and Electronics in Agriculture 55, 36-48.

Andrieu, N., Coléno, F.C., Duru, M., 2008. L'organisation du système fourrager source de flexibilité face aux variations climatiques. In: Dedieu, B., Chia, E., Leclerc, B., Moulin, C.H., Tichit, M., (Eds.). L'élevage en mouvement. Flexibilité et adaptation des exploitations d'herbivores. Quae, Versailles, France, pp. 95-110.

Ansquer, P., Theau, J.P., Cruz, P., Viegas, J., Al Haj Khaled, R., Duru, M., 2004. Caractérisation de la diversité fonctionnelle des prairies à flore complexe: vers la construction d'outils de gestion. Fourrages 179, 353-368.

Ansquer, P., Duru, M., Theau, J.P., Cruz, P., 2008. Functional traits as indicators of fodder provision over a short time scale in species-rich grasslands. Annals of Botany 103, 117-126.

Ansquer, P., Al Haj Khaled, R., Cruz, P., Theau, J.P., Therond, O., Duru, M., 2009a. Characterizing and predicting plant phenology in species-rich grasslands. Grass & Forage Science 64, 57-70.

Ansquer, P., Duru, M., Theau, J.P., Cruz, P., 2009b. Convergence in plant traits between species within grassland communities simplifies their monitoring. Ecological Indicators 9, 1020-1029.

Antle, J.M., Capalbo, S. M., Elliott, E. T., Hunt, H. W., Mooney, S., Paustian, K. H., 2001. Research needs for understanding and predicting the behavior of managed ecosystems:

Lessons from the study of agroecosystems. Ecosystems 4, 723-735.

Argyris, C., Schön, D., 1996. Organizational learning II: Theory, Method, and Practice. Addison-Wesley, Reading, 305 p.

Attonaty, J.M., Chatelin, M.H., Garcia, F., 1999. Interactive simulation modeling in farm decision-making. Computers and Electronics in Agriculture 22, 157-170.

Aubry, C., Papy, F., Capillon, A., 1998. Modelling Decision-Making Processes for annual Crop Management. Agricultural Systems 56, 45-65.

Aubry, C., Paillat, J.M., Guerrin, F., 2006. A conceptual representation of animal waste management at the farm scale: The case of the Reunion Island. Agricultural Systems 88, 294-315.

Bakker, E.S., Ritchie, M.E., Olff, H., Milchunas, D.G., Knops, J.M.H., 2006. Herbivore impact on grassland plant diversity depends on habitat productivity and herbivore size. Ecology Letters 9, 780-788.

Bammer, G. 2005. Integration and Implementation Sciences: Building a New Specialization. Ecology and Society 10(2), 6.

Bellon, S., Girard, N., Guérin, G., 1999. Caractériser les saisons-pratiques pour comprendre l'organisation d'une campagne de pâturage. Fourrages 158, 115-132.

Benkimoun, P. 2008. Les pesticides omniprésents dans l'alimentation, en France. Le Monde, 8 Mai 2008.

Bergez, J.E., Debaeke, P., Deumier, J.-M., Lacroix, B., Leenhardt, D., Leroy, P., Wallach, D., 2001. MODERATO: an object-oriented decision tool for designing maize irrigation schedules. Ecological Modelling 137, 43-60.

Bignal, E.M., McCracken, D.I., 2000. The nature conservation value of European traditional farming systems. Environmental Reviews 8, 149-171.

Blanc, F., Bocquier, F., Agabriel, J., D'Hour, P., Chilliard, Y., 2006. Adaptive abilities of the females and sustainability of ruminant livestock systems: a review. Animal Research 55, 489-510.

Blanc, F., Bocquier, F., Agabriel, J., D'hour, P., Chilliard, Y., 2008. La composante animale de la flexibilité des systèmes d'élevage. In: Dedieu, B., Chia, E., Leclerc, B., Moulin, C.H., Tichit, M., (Eds.). L'élevage en mouvement. Flexibilité et adaptation des exploitations d'herbivores. Quae, Versailles, France, pp. 73-94.

Blumthaler, M., Ambach, W., Ellinger, R., 1997. Increase in solar UV radiation with altitude. Journal of Photochemistry and Photobiology 39, 130-134.

Brunschwig, G., Josien, E., Bernhard, C., 2006. Contraintes géographiques et modes d'utilisation des parcelles en élevage bovin laitier et allaitant. Fourrages 185, 83-95.

Bryant, J.R., Snow, V.O., 2008. Modelling pastoral farm agro-ecosystems: a review. New-Zealand Journal of Agricultural Research 51, 349-363.

Caballero, R. 2007. High Nature Value (HNV) Grazing Systems in Europe: A Link between Biodiversity and Farm Economics. The Open Agriculture Journal 1, 11-17.

Cacho, O.J., Finlayson, J.D., Bywater, A.C., 1995. A simulation model of grazing sheep. II - whole farm model. Agricultural Systems 48, 27-50.

Calvo, L., Alonso, I., Fernández, A.J., De Luis, E., 2005. Short-term study of effects of fertilisation and cutting treatments on the vegetation dynamics of mountain heathlands in Spain. Plant Ecology 179, 181-191.

Carpenter, S., Walker, B., Anderies, J.M., Abel, N., 2001. From metaphor to measurement: Resilience of what to what? Ecosystems 4, 765-781.

Carsjens, G.J., van der Knaap, W., 2002. Strategic land-use allocation: dealing with spatial relationships and fragmentation of agriculture. Landscape and Urban Planning 58, 171-179.

Chardon, X., Rigolot, C., Baratte, C., Le Gall, A., Espagnol, S., Martin-Clouaire, R., Rellier, J.P., Raison, C., Poupa, J.C., Faverdin, P., 2007. MELODIE : a whole-farm model to study the dynamics of nutrients in integrated dairy and pig farms. In: Oxley, L., Kulasiri, D., (Eds.). Proceedings of the MODSIM 2007 International Congress on Modelling and Simulation. Christchurch, Nouvelle-Zélande, 10-13 December 2007, pp. 1638-1645.

Charpenteau, J.L., Duru, M., 1983. Simulation of some strategies to reduce the effect on climatic variability on farming. The case of Pyrenees Mountains. Agricultural Systems 11, 105-125.

Chazelas, L., Theau, J.P., 2008. Appréhender la diversité fonctionnelle des prairies pour mieux les gérer. In: Cruz, P., Jouany, C., Theau, J.P., (Eds.). Les Cahiers d'ORPHEE 1. INRA-SAD, Toulouse, France, pp. 289-299.

Chevassus-au-Louis, B., Génard, M., Glaszmann, J.C., Habib, R., Houllier, F., Lancelot, R., Malézieux, E., Muchnik, J., 2008. L'intégration, art ou science ? In: INRA, CIRAD, (Eds.). Proceedings of the International Conference Partnerships, Innovation, Agriculture. Paris, France, 3rd June 2008, pp. 1-27.

Clavreul, L. 2007. La pollution de l'eau par les nitrates oblige les élevages bretons à se transformer. Le Monde, 12 juillet 2007.

Coléno, F.C., Duru, M., Soler, L.G., 2002. A simulation model of a dairy forage system to

evaluate feeding management strategies with spring rotational grazing. Grass & Forage Science 57, 312-321.

Coléno, F.C., Duru, M., 2005. L'apport de la gestion de production aux sciences agronomiques. Le cas des ressources fourragères. Natures Sciences Sociétés 13, 247-257.

Coléno, F.C., Duru, M., Theau, J.P., 2005. A method to analyse decision-making processes for land use management in livestock farming. International Journal of Agricultural Sustainability 3, 69-77.

Collectif ComMod, 2006. Modélisation d'accompagnement. In: Amblard, F., Phan, D., (Eds.). Modélisation et simulation multi-agents: applications aux sciences de l'homme et de la société. Hermes sciences, Londres, Royaume-Uni, pp. 217-228.

Collège de Direction de l'INRA, 2009. Préparation du document d'orientation 2010-2014. 19 p.

Coquillard, P., Hill, D.R.C., 1997. Modélisation et simulation d'écosystèmes - Des modèles déterministes aux simulations à événements discrets. Masson, Paris, France, 269 p.

Corson, M.S., Alan Rotz, C., Howard Skinner, R., Sanderson, M.A., 2007. Adaptation and evaluation of the integrated farm system model to simulate temperate multiple-species pastures. Agricultural Systems 94, 502-508.

Cros, M.J., Duru, M., Garcia, F., Martin-Clouaire, R., 1997. Characterizing and simulating a rotational grazing strategy. In: Kure, H., Thysen, I., Kristensen, A.R., (Eds.). Proceedings of the EFITA, First Conference for Information Technology in Agriculture. Copenhague, Denmark, 15-18 June1997, pp. 379-382.

Cros, M.J., Duru, M., Garcia, F., Martin-Clouaire, R., 2001. Simulating rotational grazing management. Environment International 27, 139-145.

Cros, M.J., Duru, M., Garcia, F., Martin-Clouaire, R., 2003. A biophysical dairy farm model to evaluate rotational grazing management strategies. Agronomie 23, 105-122.

Cros, M.J., Duru, M., Garcia, F., Martin-Clouaire, R., 2004. Simulating management strategies: the rotational grazing exemple. Agricultural Systems 80, 23-42.

Cruz, P., Duru, M., Therond, O., Theau, J.P., Ducourtieux, C., Jouany, C., Al Haj Khaled, R., Ansquer, P., 2002. Une nouvelle approche pour caractériser les prairies naturelles et leur valeur d'usage. Fourrages 172, 335-354.

D'Hour, P., Revilla, R., Wright, I.A., 1998. Adaptations possibles de la conduite du troupeau allaitant aux situations extensives. Productions Animales 11, 379-386.

Da Pontes, L.D., Soussana, J.F., Louault, F., Andueza, D., Carrere, P., 2007. Leaf traits affect

the above-ground productivity and quality of pasture grasses. Functional Ecology 21, 844-853.

Daget, P., Poissonnet, P., 1971. Une méthode d'analyse phytosociologique des prairies. Critères d'application. Annales Agronomiques 22, 5-41.

Dale, A.J., Mayne, C.S., Laidlaw, A.S., Ferris, C.P., 2008. Effect of altering the grazing interval on growth and utilization of grass herbage and performance of dairy cows under rotational grazing. Grass & Forage Science 63, 257-269.

Dalgaard, T., Hutchings, N.J., Porter, J.R., 2003. Agroecology, scaling and interdisciplinarity. Agriculture, Ecosystems & Environment 100, 39-51.

Darnhofer, I., Schneeberger, W., Freyer, B., 2005. Converting or not converting to organic farming in Austria: Farmer types and their rationale. Agriculture and Human Values 22, 39-52.

Darnhofer, I., Bellon, S., Dedieu, B., Milestadt, R., 2008. Adaptive farming systems: a position paper. In: Dedieu, B., Zasser-Bedoya, S., (Eds.). Proceedings of the 8th European IFSA Symposium: Empowerment of the rural actors: a renewal of farming systems perspectives. Clermont-Ferrand, France, 6-10 July 2008, pp. 339-351.

de Bello, F., Leps, J., Sebastia, M.T., 2006. Variations in species and functional plant diversity along climatic and grazing gradients. Ecography 29, 801-810.

de Leeuw, A.C.J., Volberda, H.W., 1996. On the concept of flexibility: A dual control perspective. Omega 24, 121-139.

Dedieu, B., Chia, E., Leclerc, B., Moulin, C.H., Tichit, M., (Eds.), 2008a. L'élevage en mouvement. Flexibilité et adaptation des exploitations d'herbivores. Quae, Versailles, France, 294 p.

Dedieu, B., Louault, F., Tournadre, H., Benoit, M., 2008b. Réponse de systèmes d'élevage innovants à la variabilité climatique : une expérimentation en production extensive ovin viande intégrant des préoccupations environnementales. In: Dedieu, B., Chia, E., Leclerc, B., Moulin, C.H., Tichit, M., (Eds.). L'élevage en mouvement. Flexibilité et adaptation des exploitations d'herbivores. Quae, Versailles, France, pp. 161-178.

Development Core Team R, 2005. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria., ISBN 3-900051-07-0 http://www.R-project.org.

Diaz, S., Cabido, M., 2001. Vive la difference: Plant functional diversity matters to ecosystem processes. Trends in Ecology and Evolution 16, 646-655.

Diaz, S., Hodgson, J.G., Thompson, K., Cabido, M., Cornelissen, J.H.C., Jalili, A., Montserrat-

Marti, G., Grime, J.P., Zarrinkamar, F., Asri, Y., Band, S.R., Basconcelo, S., Castro-Diez, P., Funes, G., Hamzehee, B., Khoshnevi, M., Perez-Harguindeguy, N., Perez-Rontome, M.C., Shirvany, F.A., Vendramini, F., Yazdani, S., Abbas-Azimi, R., Bogaard, A., Boustani, S., Charles, M., Dehghan, M., Torres-Espuny, L., Falczuk, V., Guerrero-Campo, J., Hynd, A., Jones, G., Kowsary, E., Kazemi-Saeed, F., Maestro-Martinez, M., Romo-Diez, A., Shaw, S., Siavash, B., Villar-Salvador, P., Zak, M.R., 2004. The plant traits that drive ecosystems: evidence from three continents. Journal of Vegetation Science 15, 295-304.

Diaz, S., Lavorel, S., McIntyre, S., Falczuk, V., Casanoves, F., Milchunas, D.G., Skarpe, C., Rush, G., Sternberg, M., Noy-Meir, I., Landsberg, J., Zheng, W.H., Clark, H., Campbell, B.D., 2007. Plant trait responses to grazing - a global synthesis. Global Change Biology 13, 313-341.

Dillon, J.L. 1979. An evaluation of the state of affairs in Farm Management. South African Journal of Agricultural Economics 1, 7-13.

Dogliotti S., Rossing W.A.H., van Ittersum M.K., 2003. ROTAT, a tool for systematically generating crop rotations. European Journal of Agronomy 19, 239-250.

Donnelly, J.R., Moore, A.D., Freer, M., 1997. GRAZPLAN: Decision support systems for australian grazing entreprises. I. Overview of the GRAZPLAN project and a description of the MetAccess and LambAlive DSS. Agricultural Systems 54, 57-76.

Doré, T., Sebillotte, M., Meynard, J.M., 1997. A diagnostic method for assessing regional variations in crop yield. Agricultural Systems 54, 169-188.

Doré, T. 2009. Eléments de synthèse concernant la première réunion relative aux Systèmes Fourragers Innovants. 4 p.

Dorrough, J., Ash, J., McIntyre, S., 2004. Plant responses to livestock grazing frequency in an Australian temperate grassland. Ecography 27, 798-810.

Dueri, S., Calanca, P.L., Fuhrer, J., 2007. Climate change affects farm nitrogen loss - A Swiss case study with a dynamic farm model. Agricultural Systems 93, 191-214.

Dufumier, M. 2004. Quelles recherches agricoles pour le développement durable des pays du Tiers-Monde ? http://www.francophonie-durable.org/documents/colloque-ouaga-a3-dufumier.pdf

Dulphy, J.P., Martin-Rosset, W., Jouany, J.P., 1995. Ingestion et digestion comparées des fourrages entre différentes espèces d'herbivores. Productions Animales 8, 293-307.

Duru, M., Nocquet, J., Bourgeois, A., 1988. Le système fourrager, un concept opératoire ? Fourrages 115, 251-269.

Duru, M. 1992. Diagnostic de la nutrition minérale de prairies permanentes au printemps. I.

Etablissement de références. Agronomie 12, 219-233.

Duru, M., Colombani, H., 1992. Haymaking: risks and uncertainties in central Pyrenees grasslands. Agricultural Systems 38, 185-207.

Duru, M., Calviere, I., 1996. Effects of phosphorus and nitrogen nutrition status and of botanical composition of permanent pastures on their growth in spring. Agronomie 16, 217-229.

Duru, M. 1997. Leaf and stem in vitro digestibility for grasses and dicotyledons of meadow plant communities in spring. Journal of the Science of Food and Agriculture 74, 175-185.

Duru, M., Ducrocq, H., 1997. A nitrogen and phosphorus herbage nutrient index as a tool for assessing the effect of N and P supply on the dry matter yield of permanent pastures. Nutrient Cycling in Agroecosystems 47, 59-69.

Duru, M., Lemaire, G., Cruz, P., 1997. The nitrogen requirements of grasslands. In: Lemaire, G. (Ed.). Diagnosis of the Nitrogen Status in Crops. Springer, Berlin, Germany, pp. 59-72.

Duru, M., Ducrocq, H., 1998. La hauteur du couvert prairial : un moyen d'estimation de la quantité d'herbe disponible. Fourrages 154, 173-190.

Duru, M., Delaby, L., 2003. The use of herbage nitrogen status to optimize herbage composition and intake and to minimize nitrogen excretion: an assessment of grazing management flexibility for dairy cows. Grass & Forage Science 58, 350-361.

Duru, M., Hubert, B., 2003. Management of grazing systems: from decision and biophysical models to principles for action. Agronomie 23, 689-703.

Duru, M., Tallowin, J., Cruz, P., 2005. Functional diversity in low-input grassland farming systems: characterisation, effect and management. Agronomy Research 3, 125-138.

Duru, M., Cruz, P., Theau, J.P., Jouany, C., Ansquer, P., Al Haj Khaled, R., Therond, O., 2007. Typologies des prairies riches en espcèes en vue d'évaluer leur valeur d'usage : bases agro-écologiques et exemples d'applications. Fourrages 192, 453-475.

Duru, M., Cruz, P., Al Haj Khaled, R., Ducourtieux, C., Theau, J.P., 2008a. Relevance of plant functional types based on leaf dry matter content for assessing digestibility of native grass species and species-rich grassland communities in spring. Agronomy Journal 100, 1622-1630.

Duru, M., Cruz, P., Magda, D., 2008b. La conduite des couverts prairiaux, source de flexibilité. In: Dedieu, B., Chia, E., Leclerc, B., Moulin, C.H., Tichit, M., (Eds.). L'élevage en mouvement. Flexibilité et adaptation des exploitations d'herbivores. Quae, Versailles, France, pp. 57-72.

Duru, M., Cruz, P., Theau, J.P., 2008c. Un modèle générique de digestibilité des graminées des prairies semées et permanentes pour raisonner les pratiques agricoles. Fourrages 193, 79-102.

Duru, M. 2009. Interacting between agro-ecological science and manager needs at local level. A Step-by-step approach to design a toolkit for managing species-rich grasslands. En preparation pour Ecology and Society.

Duru, M., Adam, M., Cruz, P., Martin, G., Ansquer, P., Ducourtieux, C., Jouany, C., Theau, J.P., Viegas, J., 2009a. Modelling above-ground herbage mass for a wide range of grassland community types. Ecological Modelling 220, 209-225.

Duru, M., Al Haj Khaled, R., Ducourtieux, C., Theau, J.P., de Quadros, F.L.F., Cruz, P., 2009b. Do plant functional types based on leaf dry matter content allow characterizing native grass species and grasslands for herbage growth pattern? Plant Ecology 201, 421-433.

Duru, M., Bergez, J.E., Martin-Clouaire, R., 2009c. Cognitive tools to support learning about grazing management. En preparation pour Agronomy for Sustainable Development.

Dvorkin, A.Y., Steinberger, E.H., 1999. Modeling the altitude effect on solar UV radiation. Solar Energy 65, 181-187.

Edwards, J. S., Alifantis, T., Hurrion, R. D., Ladbrook, J., Robinson, S., Waller, A., 2004. Using a simulation model for knowledge elicitation and knowledge management. Simulation Modelling Practice and Theory 12, 527-540.

Ellenberg, H., Weber, H.E., Düll, R., Wirth, V., Werner, W., Paulissen, D., 1992. Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa. Scripta Geobotanica 18, 1-258.

Ersten, A.C.D., Alkemade, J.R.M., Wassen, M.J., 1998. Calibrating Ellenberg indicator values for moisture, acidity, nutrient availability and salinity in the Netherlands. Plant Ecology 135, 113-124.

Fallour, D., Theau, J.P., Corler, K., Hossard, L., Martin, G., Jouany, C., Duru, M., Cruz, P., 2008. A simplified method to determine the abundance of grass functional groups in natural grasslands. In: Hopkins, A., Gustafsson, T., Bertilsson, J., Dalin, G., Nilsdotter-Linde, N., Spörndly, E., (Eds.). Proceedings of the 22nd General Meeting of the European Grassland Federation. Uppsala, Sweden, 9-12 June 2008, pp. 93-95.

Farruggia, A., Dumont, B., Loiseau, P., Baumont, R., Jouven, M., 2006. La diversité végétale à l'échelle de l'exploitation en fonction du chargement dans un système bovin allaitant du Massif central. Fourrages 188, 477-493.

Fazey, J., Fazey, J.A., Fazey, D.M.A., 2005. Learning More Effectively from Experience. Ecology and Society 10, 4.

Fleury, P., Dubeuf, B., Jeannin, B., 1996. Forage management in dairy farms: A methodological approach. Agricultural Systems 52, 199-212.

Freer, M., Moore, A.D., Donnelly, J.R., 1997. 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, 77-126.

Garcia, F., Guerrin, F., Martin-Clouaire, R., Rellier, J.P., 2005. The human side of agricultural production management - the missing focus in simulation approaches. In: Zerger, A., Argent, R.M., (Eds.). Proceedings of the MODSIM 2005 International Congress on Modelling and Simulation. Melbourne, Australia, 12-15 December 2005, pp. 203-209.

Garnier, E., Laurent, G., Bellmann, A., Debain, S., Berthelier, P., Ducout, B., Roumet, C., Navas, M.L., 2001. Consistency of species ranking based on functional leaf traits. New Phytologist 152, 69-83.

Garnier, E., Cortez, J., Billès, G., Navas, M.L., Roumet, C., Debussche, M., Laurent, G., Blanchard, A., Aubry, D., Bellmann, A., Neill, C., Toussaint, J.P., 2004. Plant functional markers capture ecosystem properties during secondary succession. Ecology 85, 2630-2637.

Garnier, E., Lavorel, S., Ansquer, P., Castro, H., Cruz, P., Dolezal, J., Eriksson, O., Fortunel, C., Freitas, H., Golodets, C., Grigulis, K., Jouany, C., Kazakou, E., Kigel, J., Kleyer, M., Lehsten, V., Leps, J., Meier, T., Pakeman, R., Papadimitriou, M., Papanastasis, V.P., Quested, H., Quétier, F., Robson, M., Roumet, C., Rusch, G., Skarpe, C., Sternberg, M., Theau, J.P., Thebault, A., Vile, D., Zarovali, M.P., 2007. Assessing the effects of land-use change on plant traits, communities and ecosystem functioning in grasslands: a standardized methodology and lessons from an application to 11 European sites. Annals of Botany 99, 967-985.

Gillet, M. 1980. Les graminées fourragères : Description, fonctionnement, application à la culture de l'herbe. Gauthier-Villars, Paris, France, 306 p.

Gitay, H., Noble, I.R., 1997. What are functional types and how should we seek them? In: Smith, T.M., Shugart, H.H., Woodward, F.I., (Eds.). Plant functional types: their relevance to ecosystem properties and global change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, pp. 3-19.

Gosse, G., Varlet-Grancher, C., Bonhomme, R., Chartier, M., Allirand, J.M., Lemaire, G., 1986. Production maximale de matière sèche et rayonnement solaire intercepté par un couvert végétal. Agronomie 6, 47-56.

Grime, J.P. 1973. Competition and diversity in herbaceous vegetation. Nature 244, 310-311.

Grime, J.P. 1998. Benefits of plant diversity to ecosystems: immediate, filter and founder effects. Journal of Ecology 86, 902-910.

Groot, J.C.J., Rossing, W.A.H., Jellema, A., Stobbelaar, D.J., Renting, H., van Ittersum, M.K., 2007. Exploring multi-scale trade-offs between nature conservation, agricultural profits and landscape quality - A methodology to support discussions on land-use perspectives. Agriculture, Ecosystems & Environment 120, 58-69.

Guérin, G., Bellon, S., 1990. Analyse des fonctions des surfaces pastorales dans des systèmes de pâturage méditerranéens. Études et Recherches sur les Systèmes Agraires et le Développement 17, 147-158.

Hacker, J.B., Minson, D.J., 1981. The digestibility of plant parts. Herbage Abstracts 51, 459-482.

Hatchuel, A., Weil, B., 1992. L'expert et le système. Economica, Paris, France, 263 p.

Hill, M.O., Carey, P.D., 1997. Prediction of yield of the Rothamsted Park Grass by Ellenberg indicator values. Journal of Vegetation Science 8, 579-586.

Holling, C.S., Meffe, G.K., 1996. Command and Control and the Pathology of Natural Resource Management. Conservation Biology 10, 328-337.

Houiller, F. 2009. Le végétal, recherche et innovation.

http://www.inra.fr/vegetal/accueil/vegetal

Huston, M.A. 1994. Biological Diversity. The Coexistence of Species on Changing Landscapes. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 702 p.

Ingrand, S., Cournut, S., Dedieu, B., Antheaume, F., 2003. La conduite de la reproduction du troupeau de vaches allaitantes : modélisation des prises de décision. Productions Animales 16, 261-268.

Ingrand, S., Bardey, H., Brossier, J., Dedieu, B., Degrange, B., Lémery, B., Pasdermadjian, P., 2007. Flexibility of suckler cattle farms in the face of uncertainty within the beef industry: a proposed definition and an illustration. Journal of Agricultural Education and Extension 13, 39-48.

INRA, 2005. La modélisation à l'INRA.

http://www.inra.fr/mia/doc/rapport_modelisation_VO.pdf

INRA (Ed.), 2007. Alimentation des bovins, ovins et caprins. Besoins des animaux - Valeur des aliments. Tables INRA 2007. Quae Editions, Paris, France, 330 p.

Institut de l'Elevage, 2006. Naisseur de broutards en montagne Pyrénées. http://www.inst-elevage.asso.fr/html1/IMG/pdf_03-Naisseur_de_broutards_en_montagne.pdf

Jiggins, J., Roling, N., 2000. Adaptive management: potential and limitations for ecological governance. International Journal of Agricultural Resources, Governance and Ecology 1, 28-42.

Jouany, C., Cruz, P., Petibon, P., Duru, M., 2004. Diagnosing phosphorus status of natural grassland in the presence of white clover. European Journal of Agronomy 21, 273-285.

Jouven, M., Carrere, P., Baumont, R., 2006. Model predicting dynamics of biomass, structure and digestibility of herbage in managed permanent pastures. 1. Model description. Grass & Forage Science 61, 112-124.

Jouven, M., Agabriel, J., Baumont, R., 2008. A model predicting the seasonal dynamics of intake and production for suckler cows and their calves fed indoors or at pasture. Animal Feed Science and Technology 143, 256-279.

Jouven, M., Baumont, R., 2008. Simulating grassland utilization in beef suckler systems to investigate the trade-offs between production and floristic diversity. Agricultural Systems 96, 260-272.

Kazakou, E., Vile, D., Shipley, B., Gallet, C., Garnier, E., 2006. Co-variations in litter decomposition, leaf traits and plant growth in species from a Mediterranean old-field succession. Functional Ecology 20, 21-30.

Keating, B.A., McCown, R.L., 2001. Advances in farming systems analysis and intervention. Agricultural Systems 70, 555-579.

Kemp, D.R., Michalk, D.L., 2007. Towards sustainable grassland and livestock management. Journal of Agricultural Science London 145, 543-564.

Lavorel, S., Garnier, E., 2002. Predicting changes in community composition and ecosystem functioning from plant traits: revisiting the Holy Grail. Functional Ecology 16, 545-556.

Lavorel, S., Grigulis, K., McIntyre, S., Williams, N.S.G., Garden, D., Dorrough, J., Berman, S., Quétier, F., Thebault, A., Bonis, A., 2008. Assessing functional diversity in the field-methodology matters! Functional Ecology 22, 134-147.

Le Ber, F., Benoit, M., 1998. Modelling the spatial organization of land use in a farming territory. Example of a village in the Plateau Lorrain. Agronomie 18, 103-115.

Lee, K.N., 1999. Appraising adaptive management. Ecology and Society 3(2), 3.

Leeuwis, C., 2004. Communication for rural innovation: rethinking agricultural extension. Communication for rural innovation: rethinking agricultural extension. Blackwell Publishing Ltd., Oxford, United Kingdom, 412 p.

Legros, J.P., Robbez-Masson, J.M., Falipou, P., Antonioletti, R., Durand R., 1997. Bibliothèque

FLASH de calcul de l'énergie solaire, III ed. Cinq programmes INRA-Science du Sol-Montpellier.

Lemaire, G., Gastal, F., 1997. N uptake and distribution in plant canopies. In: Lemaire, G. (Ed.). Diagnosis of the Nitrogen Status in Crops. Springer, Berlin, Germany, pp 3-44.

Lemaire, G. 1999. Les flux de tissus foliaires au sein des peuplements prairiaux. Eléments pour une conduite raisonnée du pâturage. Fourrages 159, 203-222.

Lev, L., Campbell, D.J., 1987. The temporal dimension in farming systems research: the importance of maintaining flexibility under conditions of uncertainty. Journal of Rural Studies 3, 123-132.

Lieth, H., Radford, J.S., 1971. Phenology, resource management and synagraphic mapping. Bio Science 21, 62-67.

Manhoudt, A.G.E., Visser, A.J., de Snoo, G.R., 2007. Management regimes and farming practices enhancing plant species richness on ditch banks. Agriculture, Ecosystems & Environment 119, 353-358.

March, J.G. 1991. Exploration and exploitation in organizational learning. Organization Science 2, 71-87.

Marini, L., Scotton, M., Klimek, S., Isselstein, J., Pecile, A., 2007. Effects of local factors on plant species richness and composition of Alpine meadows. Agriculture, Ecosystems & Environment 119, 281-288.

Martin, G., Duru, M., Martin-Clouaire, R., Rellier, J.P., Theau, J.P., Therond, O., Hossard, L., 2008. Towards a simulation-based study of grassland and animal management in livestock farming systems. In: Sànchez-Marrè, M., Béjar, J., Comas, J., Rizzoli, A.E., Guariso, G., (Eds.). Proceedings of the iEMSs Fourth Biennial Meeting: International Congress on Environmental Modelling and Software. Barcelona, Catalonia, 7-10 July 2008, pp. 783-791.

Martin, G., Hossard, L., Theau, J.P., Therond, O., Josien, E., Cruz, P., Rellier, J.P., Martin-Clouaire, R., Duru, M., 2009a. Characterizing potential flexibility in grassland use - An application to the French Aubrac region. Agronomy for Sustainable Development 29, 381-389.

Martin, G., Martin-Clouaire, R., Rellier, J.P., Duru, M., 2009b. A conceptual model of grassland-based livestock systems. Soumis à International Journal of Agricultural and Environmental Information Systems.

Martin, G., Martin-Clouaire, R., Rellier, J.P., Duru, M., 2009c. A simulation model to design flexible grassland-based livestock systems. Soumis à Environmental Modelling and

Software.

Martin-Clouaire, R., Rellier, J.P., 2003. A conceptualization of farm management strategies. In: Proceedings of EFITA-03 conference. Debrecen, Hungary, 5-9 July 2003, pp. 719-726.

Martin-Clouaire, R., Rellier, J.P., 2006. Représentation et interprétation de plans de production flexibles. In: Garcia, F., Verfaillie, G., (Eds.). Actes des Journées Francophones sur la Planification, la Décision et l'Apprentissage pour la Conduite de Systèmes (JFPDA). Toulouse, France, 10-12 Mai 2006, pp. 149-156.

Martin-Clouaire, R., Rellier, J.P., 2009. Modelling and simulating work practices in agriculture. International Journal of Metadata, Semantics and Ontologies 4, 42-53.

Maurer, K., Weyand, A., Fischer, M., Stöcklin, J., 2006. Old cultural traditions, in addition to land use and topography, are shaping plant diversity of grasslands in the Alps. Biological Conservation 130, 438-446.

McCall, D.G., Bishop-Hurley, G.J., 2003. A pasture growth model for use in a whole-farm dairy production model. Agricultural Systems 76, 1183-1205.

McCown, R.L., Hammer, G.L., Hargreaves, J.N.G., Holzworth, D.P., Freebairn, D.M., 1996. APSIM: a novel software system for model development, model testing and simulation in agricultural systems research. Agricultural Systems 50, 255-271.

McCown, R.L. 2002a. Changing systems for supporting farmers' decisions: problems, paradigms, and prospects. Agricultural Systems 74, 179-220.

McCown, R.L. 2002b. Locating agricultural decision support systems in the troubled past and socio-technical complexity of 'models for management'. Agricultural Systems 74, 11-25.

McCown, R.L., Brennan, L.E., Parton, K.A., 2006. Learning from the historical failure of farm management models to aid management practice. Part 1. The rise and demise of theoretical models of farm economics. Australian Journal of Agricultural Research 57, 143-156.

Meinke, H., Stone, R.C., 2005. Seasonal and inter-annual climate forecasting: The new tool for increasing preparedness to climate variability and change in agricultural planning and operations. Climatic change 70, 221-253.

Meot, A., Hubert, B., Lasseur, J., 2003. Organisation of the pastoral territory and grazing management: joint modelling of grazing management practices and plant cover dynamics. Agricultural Systems 76, 115-139.

Merot, A., Bergez, J.E., Wallach, D., Duru, M., 2008. Adaptation of a functional model of grassland to simulate the behaviour of irrigated grasslands under a Mediterranean

climate: The Crau case. European Journal of Agronomy 29, 163-174.

Meynard, J.M., Aggeri, A.F., Coulon, J.B., Habib, R., Tillon, J.P., 2006. Recherches sur la conception de systèmes agricoles innovants - rapport du groupe de travail. 71 p.

Meynard, J.M., 2008. Produire autrement : réinventer les systèmes de cultures. In: Reau, R., Doré, T., (Eds.). Systèmes de culture innovants et durables. Educagri, Paris, France, pp. 11-27.

Minassian, V.T. 2009. La France a perdu 10 % de ses oiseaux en vingt ans. Libération, 23 Mai 2009.

Monteith, J.L. 1972. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. Journal of Applied Ecology 9, 747-766.

Moore, A.D., Donnelly, J.R., Freer, M., 1997. GRAZPLAN: Decision support systems for Australian grazing enterprises. III. Pasture growth and soil moisture submodels, and the GrassGro DSS. Agricultural Systems 55, 535-582.

Mueller, J.P., Barbercheck, M.E., Bell, M., Brownie, C., Creamer, N.G., Hitt, A., Hu, S., King, L., Linker, H.M., Louws, F.J., Marlow, S., Marra, M., Raczkowski, C.W., Susko D.J., Wagger, M.G., 2002. Development and implementation of a long-term agricultural systems study: challenges and opportunities. Horttechnology 12, 362-368.

Muller, A., Micol, D., Dozias, D., Peccatte, J.R., 1992. Foin ou ensilage pour les bovins en croissance en système herbager. Productions Animales 5, 121-126.

Nassauer, J.I., Opdam, P., 2008. Design in science: extending the landscape ecology paradigm. Landscape Ecology 23, 633-644.

NECSI, 2009. About complex systems. http://necsi.org/

Pacini, C., Wossink, A., Giesen, G., Huirne, R., 2004. Ecological-economic modelling to support multi-objective policy making: a farming systems approach implemented for Tuscany. Agriculture, Ecosystems & Environment 102, 349-364.

Pakeman, R.J. 2004. Consistency of plant species and trait responses to grazing along a productivity gradient: a multi-site analysis. Journal of Ecology 92, 893-905.

Parsons, A.J. 1988. The effect of season and management on the grass growth of grass sward. In: Jones, M.B., Lazenby A., (Eds.), The grass crop. Chapmann and Hall, London, United Kingdom, pp. 129-178.

Petchey, O.L., Gaston, K.J., 2006. Functional diversity: back to basics and looking forward. Ecology Letters 9, 741-758.

Petit, M., Agabriel, J., D'Hour, P., Garel, J.P., 1994. Quelques caractéristiques des races

bovines allaitantes de type rustique. Productions Animales 7, 235-243.

Plantureux, S., Bonischot, R., Guckert, A., 1992. Utilisation d'une typologie des prairies permanentes du Plateau lorrain pour le diagnostic agronomique. Fourrages 132, 381-394.

Pleasants, A.B., McCall, D. G., Sheath, G. W., 1995. The management of pastoral grazing systems under biological and environmental variation. Agricultural Systems 48, 179-192.

Pleasants, A.B., Wake, G.C., McCall, D.G., Watt, S.D., 1997. Modelling pasture mass through time in a managed grazing system subject to perturbations resulting from complexity in natural biological processes. Agricultural Systems 53, 191-208.

Quétier, F., Lavorel, S., Thuiller, W., Davies, I., 2007a. Plant-trait-based modeling assessment of ecosystem-service sensitivity to land-use change. Ecological Applications 17, 2377-2386.

Quétier, F., Thébault, A., Lavorel, S., 2007b. Plant traits in a state and transition framework as markers of ecosystem response to land-use change. Ecological Monographs 77, 33-52.

Rammel, C., Staudinger, M., 2002. Evolution, variability and sustainable development. International Journal of Sustainable Development and World Ecology 9, 301-313.

Reau, R., Doré, T., (Eds.), 2008. Systèmes de culture innovants et durables - Quelles méthodes pour les mettre au point et les évaluer ? Educagri, Paris, France, 176 p.

Reijers, H.A. 2006. Workflow flexibility: The forlorn promise. In: IEEE (Ed.). Proceedings of the 15th International Workshops on Enabling Technologies: Infrastructures for Collaborative Enterprises. Manchester, United Kingdom, 26-28 June 2006, pp. 271-272.

Rellier, J.P. 2005. DIESE : un outil de modélisation et de simulation de systèmes d'intérêt agronomique. Internal report UBIA-INRA, Toulouse-Auzeville.

http://carlit.toulouse.inra.fr/diese/docs/ri_diese.pdf

Röling, N., Wagemakers, M.A.E., (Eds.), 1998. Facilitating sustainable agriculture. Participatory learning and adaptive management in times of environmental uncertainty. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 318 p.

Romera, A.J., Morris, S.T., Hodgson, J., Stirling, W.D., Woodward, S.J.R., 2004. A model for simulating rule-based management of cow-calf systems. Computers and Electronics in Agriculture 42, 67-86.

Ronan, G. 2002. Delving and Divining for Australian Farm Management Agenda: 1970-2010. Agribusiness Review 10, 7.

Rossing, W.A.H., Jansma, J.E., De Ruijter, F.J., Schans, J., 1997. Operationalizing sustainability: exploring options for environmentally friendly flower bulb production

systems. European Journal of Plant Pathology 103, 217-234.

Rotz, C.A., Buckmaster, D.R., Comerford, J.W., 2005. A beef herd model for simulating feed intake, animal performance, and manure excretion in farm systems. Journal of Animal Science 83, 231-242.

Rotz, A.C., Corson, M.S., Chianese, D.S., Coiner, C.U., 2009. The integrated farming system model. Reference Manual. Version 3.2.

http://ars.usda.gov/SP2UserFiles/Place/19020000/ifsmreference.pdf

Sawhney, R. 2006. Interplay between uncertainty and flexibility across the value-chain: towards a transformation model of manufacturing flexibility. Journal of Operations Management 42, 476-93.

Schaffers, A.P., Sykora, K.V., 2000. Reliability of Ellenberg indicator values for moisture, nitrogen and soil reaction: a comparison with field measurements. Journal of Vegetation Science 11, 225-244.

Schneeweis, C. 1995. Hierarchical structure in organisation: a conceptual framework. European Journal of Operational Research 81, 4-31.

Scholefield, D., Lockyer, D.R., Whitehead, D.C., Tyson, K.C., 1991. A model to predict transformations and losses of nitrogen in UK pastures grazed by beef cattle. Plant and Soil 132, 165-177.

Sebillote M., Soler L.G., 1988. Le concept de modèle général et la compréhension du comportement de l'agriculteur. Compte Rendu de l'Académie d'Agriculture Française 74, 59-70.

Sersia France, 2009. Présentation de la GASCONNE SERSIA France.

http://www.sersia.fr/upload/article_paragraphe/fichier/258fichier.pdf

Sinclair, K.D., Agabriel, J., 1998. The adaptation of domestic ruminants to environmental constraints under extensive conditions, Annales de Zootechnie 47, 347–358.

Smart, S.M., Clarke, R.T., van de Poll, H.M., Robertson, E.J., Shield, E.R., Bunce, R.G.H., Maskell, L.C., 2003. National-scale vegetation change across Britain; an analysis of sample-based surveillance data from the countryside surveys of 1990 and 1998. Journal of Environmental Management 67, 239-254.

Snow, V.O., Lovatt, S.J., 2008. A general planner for agro-ecosystem models. Computers and Electronics in Agriculture 60, 201-211.

Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenaar, T., Castel, V., Rosales, M., Haan, C., 2006. Livestock's long shadow: environmental issues and options. FAO, Rome, Italy, 390 p.

Sterk, B., van Ittersum, M.K., Leeuwis, C., Rossing, W.A.H., van Keulen, H., van de Ven, G.W.J., 2006. Finding niches for whole-farm design models - contradictio in terminis. Agricultural Systems 87, 211-228.

Sterk, B., Leeuwis, C., van Ittersum, M.K., Martin, G., Dogliotti, S., 2007. Computer models in action - Learning by doing in an Uruguayan on-farm research project. In: Sterk, B. A window of opportunities: the contributions of land use modeling to societal learning. PhD thesis, Wageningen University, The Netherlands.

Stockle, C.O., Donatelli, M., Nelson, R., 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. European Journal of Agronomy 18, 289-307.

ten Berge, H.F.M., van Ittersum, M.K., Rossing, W.A.H., van de Ven, G.W.J., Schans, J., 2000. Farming options for The Netherlands explored by multi-objective modelling. European Journal of Agronomy 13, 263-277.

Theau, J.P., Coléno, F.C., Duru, M., Rauzy, Y., 1998. L'utilisation de l'herbe pâturee et fauchee en reference au potentiel de production des prairies. Fourrages 156, 589-601.

Thenail, C., Baudry, J., 2004. Variation of farm spatial land use pattern according to the structure of the hedgerow network (bocage) landscape: a case study in northeast Brittany. Agriculture, Ecosystems & Environment 101, 53-72.

Thompson, K., Hodgson, J.G., Grime, J.P., Rorison, I.H., Band, S.R., Spencer, R.E., 1993. Ellenberg numbers revisited. Phytocoenologia 23, 277-289.

Thornton, P.K., Herrero, M., 2001. Integrated crop-livestock simulation models for scenario analysis and impact assessment. Agricultural Systems 70, 581-602.

Tichit, M., Ingrand, S., Moulin, C.H., Cournut, S., Lasseur, J., Dedieu, B., 2004. Analyser la diversité des trajectoires productives des femelles reproductrices : intérêts pour modéliser le fonctionnement du troupeau en élevage allaitant. Productions Animales 17, 123-132.

Tichit, M., Doyen, L., Lemel, J.Y., Renault, O., Durant, D., 2007. A coviability model of grazing and bird community management in farmland. Ecological Modelling 206, 277-293.

Tittonell, P., Vanlauwe, B., de Ridder, N., Giller, K.E., 2007. Heterogeneity of crop productivity and resource use efficiency within smallholder Kenyan farms: Soil fertility gradients or management intensity gradients? Agricultural Systems 94, 376-390.

van der Ploeg, J.D. 1994. Styles of Farming: an Introductory Note on Concepts and Methodology. In: van der Ploeg, J.D., Long, A., (Eds.). Born from within. Practice and perspectives of endogenous rural development. Van Gorcum, Assen, The Netherlands,

pp. 7-30.

van Ittersum, M.K., Rabbinge, R., 1997. Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations. Field Crops Research 52, 197-208.

van Ittersum, M.K., Donatelli, M., 2003. Modelling cropping systems--highlights of the symposium and preface to the special issues. European Journal of Agronomy 18, 187-197.

van Ittersum, M.K., Ewert, F., Heckelei, T., Wery, J., Alkan Olsson, J., Andersen, E., Bezlepkina, I., Brouwer, F., Donatelli, M., Flichman, G., Olsson, L., Rizzoli, A.E., van der Wal, T., Wien, J.E., Wolf, J., 2008. Integrated assessment of agricultural systems - A component-based framework for the European Union (SEAMLESS). Agricultural Systems 96, 150-165.

van Keulen, H. 2006. Heterogeneity and diversity in less-favoured areas. Agricultural Systems 88, 1-7.

van Paassen, A., Roetter, R.P., van Keulen, H., Hoanh, C.T., 2007. Can computer models stimulate learning about sustainable land use? Experience with LUPAS in the humid (sub-)tropics of Asia. Agricultural Systems 94, 874-887.

Vayssières, J., Guerrin, F., Paillat, J.M., Lecomte P., 2009. GAMEDE: A global activity model for evaluating the sustainability of dairy enterprises Part I - Whole-farm dynamic model. Agricultural Systems 101, 128-138.

Venables, W.N., Ripley, B.D., 1994. Modern Applied Statistics with S-Plus. Springer, New York, USA, 462 p.

Vereijken, P. 1997. A methodical way of prototyping integrated and ecological arable farming systems (I/EAFS) in interaction with pilot farms. European Journal of Agronomy 7, 235-250.

Veysset, P., Bebin, D., Lherm, M., 2005. 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, 179-202.

Voisin, A. 1957. Productivité de l'herbe. Flammarion, La Terre, Encyclopédie paysanne, Paris, France, 486 p.

Wezel, A., Bellon, S., Doré, T., Francis, C., Vallod, D., David, C., 2009. Agroecology as a science, a movement or a practice. A review. Agronomy for Sustainable Development 29, 503-516.

White, T.A., Barker, D.J., Moore, K.J., 2004. Vegetation diversity, growth, quality and decomposition in managed grasslands. Agriculture, Ecosystems & Environment 101, 73-

84.

Willems, J.H., van Nieuwstadt, M.G.L., 1996. Long-term after effects of fertilization on above-ground phytomass and species diversity in calcareous grassland. Journal of Vegetation Science 7, 177-184.

Woodward, S.J.R., Romera, A.J., Beskow, W.B., Lovatt, S.J., 2008. Better simulation modelling to support farming systems innovation: Review and synthesis. New Zealand Journal of Agricultural Research 51, 235-252.

Zingore, S., González-Estrada, E., Delve, R.J., Herrero, M., Dimes, J.P., Giller, K.E., 2009. An integrated evaluation of strategies for enhancing productivity and profitability of resource-constrained smallholder farms in Zimbabwe. Agricultural Systems 101, 57-68.

Analyse et conception de systèmes fourragers flexibles par modélisation systémique et simulation dynamique

Les systèmes fourragers sont difficiles à gérer, en particulier à cause de leur sensibilité aux variations climatiques. La conception de systèmes fourragers flexibles, capables de garantir voire d'accroître leurs performances productives et environnementales face à ces variations, est donc un enjeu important. Cet objectif nécessite de la part de l'éleveur un comportement gestionnaire qui valorise la diversité biologique végétale et animale, et du territoire d'exploitation. Pour ce faire, cette thèse propose une démarche de modélisation systémique et de simulation dynamique permettant d'étudier une large gamme de systèmes fourragers sous différents contextes de production. Sa principale originalité réside dans la représentation des comportements gestionnaires sous forme de plans flexibles d'activités par lesquelles les éleveurs contrôlent les processus biologiques en œuvre dans leurs systèmes. Un exemple d'application illustre comment, grâce au réalisme de cette représentation, la mise en oeuvre de la démarche contribue à stimuler l'apprentissage des experts et des chercheurs, en remettant en cause, à l'échelle du système fourrager, leurs hypothèses issues d'un diagnostic de pratiques d'éleveur à l'échelle de la parcelle.

MOTS-CLES : système fourrager, modélisation, simulation, diversité, flexibilité, comportement gestionnaire

---

Analysis and design of flexible grassland-based livestock systems by systemic modeling and dynamic simulation

Grassland-based livestock systems are difficult to manage, particularly because of their sensitivity to weather variations. The design of flexible systems, capable of maintaining or even increasing their productive and environmental performances in spite of such variations, is thus a major issue. Such aim requires that the farmer's management behavior be oriented toward the exploitation of the opportunities provided by plant, animal and farmland diversity. To this end, this thesis proposes an approach relying on systemic modeling and dynamic simulation that enables to study a wide range of grassland-based livestock systems under different production contexts. Its main originality is the modeling of management behaviors as flexible plans of activities through which the farmer controls the biological processes occurring within the system. Thanks to the realism of this representation, an example of application displays how the use of the proposed approach contributes to stimulate learning of experts and researchers by reviewing, at the system scale, their hypothesis formulated at the plot scale based on a diagnosis of the farmers' practices.

KEYWORDS: grassland-based livestock system, modeling, simulation, diversity, flexibility, management behavior

---

LIEU ET DATE DE SOUTENANCE : Centre INRA Toulouse le 9 novembre 2009

DISCIPLINE ADMINISTRATIVE : Agronomie

AUTEUR : Guillaume Martin

DIRECTEURS DE THESE : Michel Duru et Roger Martin-Clouaire

LABORATOIRES D'ACCUEIL :

UMR INRA/INPT-ENSAT 1248 AGIR (AGrosystèmes et Développement terrItoRial)
UR INRA 875 BIA (Biométrie et Intelligence Artificielle)