



HAL
open science

Dynamilk : un simulateur pour étudier les compromis entre performances animales, utilisation des ressources herbagères et recherche d'autonomie alimentaire dans les systèmes bovins laitiers de montagne

Anne-Lise Marie Jacquot

► **To cite this version:**

Anne-Lise Marie Jacquot. Dynamilk : un simulateur pour étudier les compromis entre performances animales, utilisation des ressources herbagères et recherche d'autonomie alimentaire dans les systèmes bovins laitiers de montagne. Sciences agricoles. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 2012. Français. NNT : 2012CLF22254 . tel-00825677

HAL Id: tel-00825677

<https://theses.hal.science/tel-00825677>

Submitted on 24 May 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



VetAgro Sup
Campus agronomique de Clermont

N° D.U. 2254

Ecole Doctorale : Sciences et Vie, Santé, Agronomie, Environnement
N° d'ordre 586

THESE

Pour l'obtention du grade de

Docteur d'université

Spécialité : Agronomie

Dynamilk :

un simulateur pour étudier les compromis entre performances animales,
utilisation des ressources herbagères et recherche d'autonomie alimentaire
dans les systèmes bovins laitiers de montagne

Par

Anne-Lise JACQUOT

Soutenue publiquement le 9 juillet 2012

Composition du Jury :

Rapporteur

Corine BAYOURTHE

Professeur

Rapporteur

Charles-Henri MOULIN

IGREF-HDR

Rapporteur

Daniel SAUVANT

Professeur

Examineur

Rémy DELAGARDE

Ingénieur de recherche

Examineur

Christine FORCE

Maître de conférences

Directeur de thèse

René BAUMONT

Directeur de recherche

Directeur de thèse

Gilles BRUNSCHWIG

Professeur

Thèse préparée au sein de l'unité mixte de recherche Herbivores 1213, INRA – VetAgro Sup



VetAgro Sup
Campus agronomique de Clermont

Ecole Doctorale : Sciences et Vie, Santé, Agronomie, Environnement

THESE

Pour l'obtention du grade de

Docteur d'université

Spécialité : Agronomie

Dynamilk :

un simulateur pour étudier les compromis entre performances animales,
utilisation des ressources herbagères et recherche d'autonomie alimentaire
dans les systèmes bovins laitiers de montagne

Par

Anne-Lise JACQUOT

Soutenance le 9 juillet 2012

Composition du Jury :

Rapporteur

Rapporteur

Rapporteur

Examineur

Examineur

Directeur de thèse

Directeur de thèse

Corine BAYOURTHE

Charles-Henri MOULIN

Daniel SAUVANT

Rémy DELAGARDE

Christine FORCE

René BAUMONT

Gilles BRUNSCHWIG

Professeur

IGREF-HDR

Professeur

Ingénieur de recherche

Maître de conférences

Directeur de recherche

Professeur

Thèse préparée au sein de l'unité mixte de recherche Herbivores 1213, INRA – VetAgro Sup

EPITRE DEDICATOIRE

Ah les remerciements !! En trois ans et quelques brouettes, il s'en est passé des choses, que de monde croisé dans le monde professionnel ou dans la sphère personnelle...

Tout d'abord, je tenais à remercier les membres du jury qui ont bien voulu prendre de leur temps pour évaluer mon travail et apporter leur pierre à l'édifice par leurs remarques. Donc merci à Corine Bayourthe, Charles-Henri Moulin, Daniel Sauvant, Rémy Delagarde et Christine Force.

Je remercie également mes encadrants, René Baumont et Gilles Brunschwig, qui, chacun à leur manière, m'ont aidée, poussée, orientée, parfois désorientée tout au long de ce chemin parfois tortueux mais toujours intéressant et surtout, pour aller toujours plus loin.

Je tenais à remercier les membres de mon comité de pilotage qui se sont intéressés et impliqués dans la réalisation de ce travail : Fabienne Blanc, Jacques Agabriel, Sophie Hulin, Cyrille Rigolot, Pascal Carrère et Christophe Poix.

La thèse n'aurait pas pu se réaliser sans l'aide financière et matérielle de VetAgro Sup et le département PHASE de l'INRA. Cette thèse a aussi été financée par le Pôle Estive dans le cadre du Volet 1 « Territoire et élevage extensif » du programme « Territoire-Agriculture-Alimentation en Auvergne » ainsi que par le département Phase sur la thématique « Système d'élevage ». Cette thèse s'est également inscrite dans le cadre du projet CASDAR «Productions fromagères AOC du Massif Central : vers une meilleure utilisation et une valorisation des prairies en lien avec la qualité des produits » qui a notamment permis de financer le stage informatique de Marie-Agnès Blanco.

Au cours de cette thèse j'ai ainsi été très bien accueillie par les équipes de recherche de l'URH – RAPA et l'UR-EPR de l'Enita Clermont, devenu ensuite UR-EPR

VetAgro Sup et enfin UMRH – Sybel VetAgro Sup (que de changements en si peu de temps !). Ainsi, merci à tous les membres de ces deux équipes de m'avoir accueilli, écouté et aidé quand il le fallait.

Je tenais également à remercier toutes les personnes qui ont, de près ou de loin, contribué à ce travail et qui ont permis que cette thèse et que Dynamilk existent : Christophe Poix pour tes conseils avisés, ta grande pédagogie, pour avoir été mon Maître Yoda de la pensée UML et plus généralement, pour ta disponibilité, ton aide et ton humour; Luc Delaby, ah Luc, un grand merci pour ton aide sur le modèle animal ! Merci pour les jours que tu m'as consacrés ! Quel plaisir de travailler avec toi ou tout simplement parler zootechnie et modélisation !; Claire Agabriel pour ton implication, tes conseils, tes relectures précises, ta confiance et ton écoute, j'ai beaucoup appris grâce à toi ; Dominique Pomiès pour ton expertise zootechnique ; Jacques Agabriel pour tes connaissances zootechniques, en modélisation et sur les génisses et plus particulièrement pour tes dons de trésors (ou autre bulletin technique ou livre rouge vintage) ; Fabienne Blanc pour tous tes conseils avisés, tes relectures et ton implication, Bruno Martin pour ton aide. Un remerciement spécial également pour Stéphane Ingrand à qui je dois le nom du simulateur Dynamilk (choisi parmi d'autres petits noms et testé au près d'un grand nombre de personnes !)

Merci à Annabel Barthélémy pour ton aide sur le montage final de ce manuscrit ; à Béatrice Davi pour la mise au point de la charte biblio ; à Lydie Ménadier et Lodoïc de Kerret pour leur relecture attentive.

Je souhaiterais particulièrement remercier le trio d'informaticiens qui ont permis à Dynamilk de voir le jour : Marie-Agnès Blanco qui a posé les bases et la structure du simulateur, quel plaisir d'avoir travaillé en si étroite collaboration, tes capacités à intégrer les processus agronomiques et zootechniques, à comprendre et à traduire en langage informatique ce que je voulais ont été extraordinaires ; Anne Lamadon pour avoir continué ce travail, de t'être autant impliquée, d'avoir passé autant de temps à VetAgro Sup avec moi et Yoan Gaudron d'avoir permis de traiter plus facilement la masse considérable de données que « crache » Dynamilk.

Plus largement, j'étais très heureuse de partager de bons moments ou juste parfois quelques mots avec toutes les personnes rencontrées à VetAgro ou à Theix, au détour d'un couloir, pendant les repas ou les pauses café. Ainsi je remercie le Pôle Doc, mon repère favori pour assouvir mes penchants de caféinomaniac : Esmé, Flo, Nico, Richard, Béa, Christophe, Jacqueline, Elisa et Michel; à mes colocataires de bureau successifs : Benoît, Emilie (bientôt ce sera ton tour ! courage !) et Lydie ; tous les couloirs du D1 : Yves et tes thés, les Claires, Valérie, Fabienne, Sylvie, Dominique, Isabelle, Gaël, Nathalie, Mathieu, Noëlle, Chantal et Cécile, Aude, Ambroise, Shantala et toutes les personnes ayant séjourné, là-bas, si loin, au fond du couloir ; et bien sûr, le secrétariat du D1, toujours rempli de bonne humeur et parfois de chocolat ou gâteaux ! Séverine, Farida, Patricia et Zoulette ; le service informatique pour leur aide et disponibilité (souvent en cas de gros stress). Alors même si la plupart du temps, je ne faisais que passer en coup de vent, là-haut, dans la montagne, j'ai une petite pensée pour mes

collègues de l'INRA de Theix que je retrouvais la plupart du temps au doux son du « CAFEEEE » hurlé dans le couloir. Une pensée spéciale au cartel des thésardes de René, Raphaëlle (crois-tu que j'arrêteraï de chanter LA chanson des Monthy Python ??) et Amélie.

Avec l'élaboration et l'achèvement de ce manuscrit, c'est quelque part l'aboutissement d'un long chemin entamé il y a bien longtemps... Je tenais ainsi à remercier un certain nombre de personnes qui m'ont transmis beaucoup, et notamment la passion de la zootechnie (des vaches !!), des systèmes d'élevage et de l'approche systémique ou encore de la modélisation : l'équipe « zoot » de l'AgroParisTech avec entre autres Jean Lossouarn, Philippe Schmidely et Daniel Sauvant ; l'équipe « APS » de Wageningen Universiteit avec Eddie Bokkers et Imke de Boer qui ont posé les prémices de l'approche systémique ; Dominique Tristant de Grignon Energie Positive pour m'avoir introduite aux joies de la modélisation et Alain Claudel, pour m'avoir fait découvrir « de l'intérieur » ce que c'était un élevage, de produire avec du vivant...

Enfin, je tenais à remercier également tous mes amis qui m'ont tous apportée de la joie, des fous rires, des bons moments, du réconfort...: ma sophinette et nos sismantic moments, notre amitié si précieuse, nos petits messages et appels réguliers pour se dire tout et rien, commenter « l'actualité » la plus brulante ^-^; Shantala, mon rayon de soleil, tes 36000 projets et idées à la minute, tes desserts démoniaques et les plats gargantuesques de Rochinou, nos conversations sans fin pour refaire le monde, repenser la recherche, l'agronomie... ; Lia et nos petites conversations quotidiennes, ah qu'est-ce que ça fait du bien d'avoir un petit soutien « modélisation » !!, merci de m'avoir parfois offert des moments de calme et tranquillité au cours de balades ; Christophe pour ta bonne humeur, tes petites soirées et tes petits rhums, le corner-blase attend ton retour!!; Richard et Béa pour toutes ces soirées « en famille », tous ces moments partagés, les soirées-tricots, les sorties motos, les concerts, Bicky et ses soeurs... (et les poulets rôtis ! truffades, marteaux et autres joyeusetés) et j'ai envie de dire : vivement le Servières !! Et puis, c'était cool Richard de partager ton bureau avec moi, je m'y sentais très bien (merci Blase de m'avoir prêté ton bureau, même si je ne t'ai jamais demandé l'autorisation ^-^). Lydie, mon petit têtard, petit être furtif et fugace, un peu difficile à apprivoiser, mais avec du temps on y arrive !!! Voilà, j'étais très heureuse de partager tous ces moments avec toi d'abord au bureau, puis en tant qu'amie, en voyage et maintenant en coloc (dommage qu'on n'ait pas pu en profiter plus !). Et maintenant, on schlouf-schlouf ? J'espère que nous réaliserons tous nos projets, voyages... Et puis, je voudrais avoir une petite pensée pour tous mes amis, d'ici et d'ailleurs, que j'ai un peu délaissé ces derniers temps, dans ma contrée reculée Clermontoise : Clotilde, Laureline, Keira, David et Séverine, José et Julia, Smaks et bien d'autres encore...

Je voudrais remercier également la famille Kerret pour leur accueil et leurs attentions en cette fin de thèse : Véronique, Philippe, Gwenaëlle et Sébastien.

Je voudrais particulièrement remercier ma famille (tantes, oncles, cousins/cousines) que je n'ai pas pu beaucoup voir ces derniers temps mais qui ont toujours pensé à moi, je le sais ; mes grands-pères et ma grand-mère, aujourd'hui

disparus, mais qui ne sont certainement pas étrangers à mon attachement à la terre, à l'agriculture ; ma grand-mère si aimante et confiante, en toutes circonstances.

Maman, Papa, merci d'avoir été là, tout le temps, pour me soutenir, pour me reconforter, tout au long de la thèse, mais bien plus encore. Merci pour m'avoir transmis tant et autant d'amour. Et Simon, mon affreux frère adoré, tu vois, j'ai un peu travaillé pendant tout ce temps... Et reviens-vite à Clermont qu'on puisse voir un vrai match !

Lodoïc, mon Lodo, voilà cette thèse est finie et je te la dédie. Merci de m'avoir tant soutenue tout au long de cette thèse, d'avoir partagé les bons moments comme ceux plus difficiles. Le résumé que tu faisais de mes travaux m'a toujours bien fait rire et m'a toujours bien aidé à expliquer ce que je faisais : « tu vois Simcity, ben c'est la même chose mais avec des vaches ». Et plus sérieusement, merci de partager tant avec moi, d'apporter joie, douceur, un certain grain de folie dont j'ai tant besoin qui rend la vie à tes côtés si spéciale. Maintenant que cette page est presque tournée, il est temps de réaliser nos rêves et nos projets.

SOMMAIRE

CHAPITRE I

Introduction générale : contexte de la thèse	1
1.1 Elevages laitiers herbagers en zones contraignantes : quelle place dans l'élevage français ?	2
1.2 Elevages laitiers herbagers de montagne : des systèmes plus sensibles aux évènements climatiques	8
1.3 Hypothèse et stratégie de recherche	10
1.4 Définition des éléments étudiés lors de la thèse	12

CHAPITRE II

Approche systémique et modélisation pour l'étude de l'autonomie à l'échelle de l'exploitation	13
2.1 L'autonomie comme composante de la durabilité	14
2.2 Autonomie et adaptabilité des systèmes aux perturbations	19
2.3 Approche systémique et modélisation	23
2.4 Les modèles de systèmes de production animale (ou de systèmes d'élevage)	28

CHAPITRE III

Démarche scientifique	34
3.1 Développement des questions de recherche	35
3.2 Démarche méthodologique	37
3.3 Démarche de thèse et plan de thèse	39

CHAPITRE IV

Cahier des charges et structure du modèle	42
4.1 Conception du modèle	43
4.2 Formalisation du modèle global	49

CHAPITRE V

Le sous-modèle « troupeau laitier »	60
5.1 Conception du modèle « troupeau laitier »	61
5.2 Représentation du troupeau laitier : le module démographique	63
5.3 Définition de « l'animal pilote »	72
5.4 Composition de la ration ingérée	76
5.5 Module dynamique d'ingestion, production laitière et mobilisation des réserves corporelles des animaux	77
5.6 Validation du modèle : cas du lot des vaches laitières en lactation	93

CHAPITRE VI

Le sous-modèle « conduite »	107
6.1 Structure et fonctionnement du sous-modèle de conduite	108
6.2 Illustration du fonctionnement du simulateur et validation à l'échelle système	120

CHAPITRE VII**Quel système pour une meilleure autonomie alimentaire et fourragère à l'échelle de l'exploitation ? 132**

- 7.1 Choix des systèmes étudiés 133
- 7.2 Choix des indicateurs pour évaluer les systèmes 140
- 7.3 Résultats des simulations 143

CHAPITRE VIII**Incidence du chargement et de la quantité d'aliments concentrés sur l'utilisation de l'herbe, la production laitière et l'autonomie du système de production 162**

- 8.1 Quelles sont les marges de manœuvres pour maximiser la valorisation de l'herbe ? 163
- 8.2 Incidence du chargement 163
- 8.3 Incidence du niveau des apports de concentrés 180
- 8.4 En conclusion 194

CHAPITRE IX**Discussion générale 195**

- 9.1 Les apports de Dynamilk à la construction des compromis entre production et utilisation des prairies 196
- 9.2 Domaine de validité et contraintes d'utilisation de Dynamilk 205
- 9.3 Intérêt et originalité de Dynamilk 210

Conclusion 217**Références bibliographiques 222****Liste des réalisations scientifiques 243****Liste des abréviations 247****Table des illustrations 248****Table des matières 254****Annexes**

- Annexe 1 Analyse des cahiers des charges AOP i
- Annexe 2 Document « scénario » du simulateur Dynamilk xi
- Annexe 3 Fonctionnement du modèle démographique xii
- Annexe 4 Enquêtes en exploitation : questionnaire et rendu xx

CHAPITRE I

1 INTRODUCTION GENERALE : CONTEXTE DE LA THESE

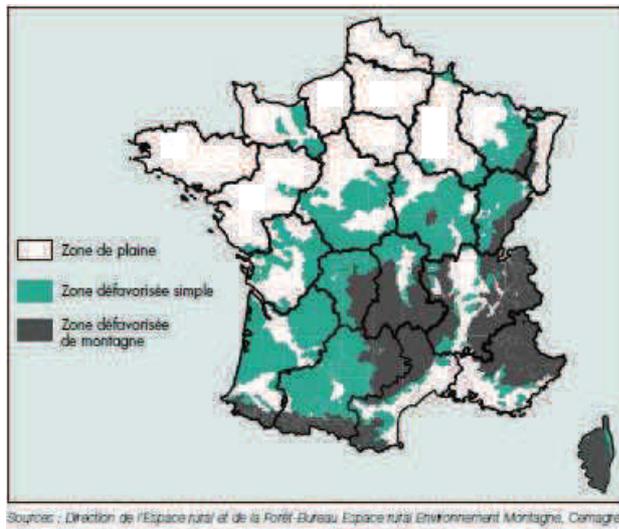
1.1 Elevages laitiers herbagers en zones contraignantes : quelle place dans l'élevage français?

Selon les données du recensement agricole, l'agriculture de montagne et de piémont est un élément non négligeable dans le paysage agricole française puisqu'une exploitation sur cinq en France se situe dans ces zones en 1997 (Figure 1 - carte a) (Agreste, 1999). La classification d'une commune en zone montagne et piémont est définie par la loi montagne, article 3 (n° 85-30 du 9 janvier 1985) reposant sur certains critères physiques : « une altitude supérieure à 700m (ou 600 m pour les Vosges), des pentes de plus de 20 % sur au moins 80 % du territoire communal et/ou des conditions climatiques très difficiles se traduisant par une période de végétation sensiblement raccourcie ». Ces critères physiques ont pour effet de restreindre de façon conséquente les possibilités d'utilisation des terres et d'augmenter les coûts de production de toute activité agricole sur cette zone (Legifrance, 1985, Montagne, 2005). La montagne et le piémont sont ainsi considérés comme des zones défavorisées (Chatellier et Guyomard, 2008), leur répartition sur le territoire national est décrite sur la Figure 1 - carte a.

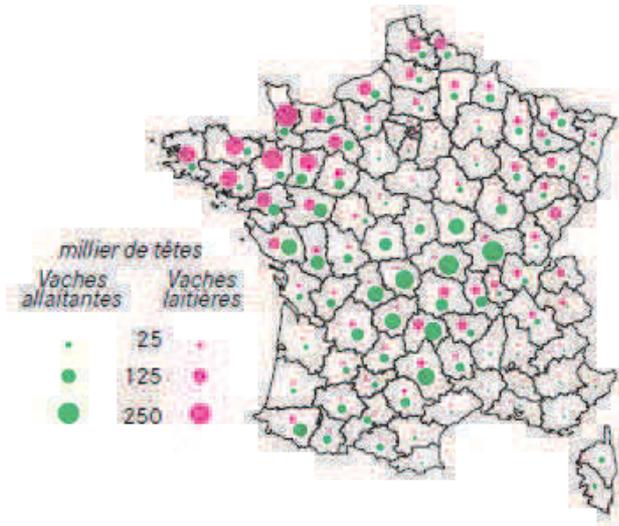
L'agriculture de montagne est largement orientée vers la production d'herbivores (87% des exploitations professionnelles de la zone) (Agreste, 2000, Chatellier et Guyomard, 2008), avec une prédominance de la production de bovins allaitants (40%) mais aussi de la production laitière (33%), Figure 1 – carte b (Agreste, 2011a). 38% des exploitations laitières nationales sont situées en zone contraignantes dont 24% en montagne et 14% en zone défavorisée simple (Chatellier et Guyomard, 2008).

Dans les régions de montagne et les zones défavorisées, la surface fourragère (SF) occupe une large partie de la surface agricole utile (SAU) et les prairies, temporaires ou permanentes, sont prépondérantes parmi cette surface fourragère, comme le montre la Figure 1– carte c (Agreste, 2011b). En effet, les zones défavorisées et montagnardes regroupent 62 % des surfaces en prairie recensées en France (Agreste, 1999). Plus précisément, 38 % des surfaces en prairie permanentes du territoire national se situent en zones montagnardes (Chatellier et Guyomard, 2008, Chatellier *et al.*, 2008).

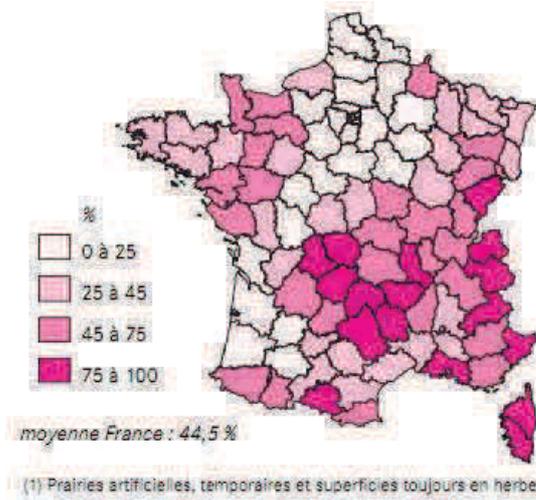
Les zones de montagne et de piémont subissent des contraintes. Les contraintes peuvent être définies comme un facteur limitant du système de production, restreignant le champ des possibles (ou usages possibles), pouvant ou non être contourné en intervenant sur les coûts et l'organisation du travail (Bonneviale *et al.*, 1989).



a) Localisation des zones de plaine, des zones défavorisées simples et des zones de montagne en France (Agreste, 1999)



b) Localisation des effectifs bovins laitiers et allaitants en France (Agreste, 2010)



c) Localisation de la part des prairies (1) dans la surface agricole utile en France (Agreste, 2010)

Figure 1 : Eléments de localisation en France des zones reconnues défavorables (a), des effectifs bovins (b) et de la part des prairies dans la surface agricole utile (c)

Les contraintes agissant en milieu montagnard ou de piémont peuvent être d'ordre:

- ◆ **géographique** : limitation des possibilités d'intensification des exploitations en termes de production par unité de production, animale ou surfacique, du fait de l'augmentation des coûts de production (Agreste, 1999) et de la pénibilité du travail et de son organisation. Ces limitations sont dues au morcellement, à l'éloignement, à la pente et au manque de possibilité de mécanisation, à des accès difficiles, à la portance, à l'accès au point d'eau des animaux au pâturage... (Brunschwig *et al.*, 2002, Chatellier *et al.*, 2008, Combret *et al.*, 2009, Garcia-Launay *et al.*, 2011)
- ◆ **agronomique** : de part un contexte pédoclimatique rude, rendant les opportunités de diversification agricole limitées (limite d'altitude pour la culture des céréales ou le maïs fourrager), une période de végétation plus courte et condensée ainsi qu'une fertilité du milieu plus faible comparativement aux surfaces agricoles en plaine (Legifrance, 1985, Agreste, 1999, Chatellier *et al.*, 2004, Perrot *et al.*, 2005)

Ces contraintes entraînent un dimensionnement et un chargement plus faible des exploitations laitières en montagne comparativement à celles de plaine ou des zones défavorisées simples (Agreste, 2000, Chatellier et Guyomard, 2008, Chatellier *et al.*, 2008). Les résultats économiques des unités laitières montagnardes sont ainsi plus faibles malgré des aides directes à l'hectare plus importantes (83% des indemnités compensatoires des handicaps naturels, ICHN, sont perçues par les exploitations classées en zone montagne) (Agreste, 2000, Chatellier et Guyomard, 2008).

Les exploitations laitières herbagères de montagne sont ainsi moins compétitives par rapport aux autres unités laitières sur la production de lait tout-venant. Cependant, elles présentent certains atouts par les services qu'elles sont en mesure de rendre, valorisables aux yeux de la société.

1.1.1 Multifonctionnalités de l'élevage laitier herbager et services associés

Depuis la fin des années 1980, l'élevage, tout comme l'agriculture plus généralement, a dépassé le cadre d'un secteur particulier à visée unique : la production à des fins d'auto-provisionnement national (Landais, 1999, Lacombe, 2002). L'agriculture devient ainsi une question de société où l'agriculteur n'est plus le seul acteur à décider de l'avenir de l'espace rural (Landais, 1999). L'agriculture et l'élevage sont ainsi placés au cœur d'enjeux sociétaux définissant de nouveaux horizons pour la production agricole : utilisation des ressources naturelles, surfaces et territoires, définition de nouvelles exigences en matière d'environnement, santé publique, bien-être animal... Ces réorientations s'effectuent notamment par le biais de politiques publiques, comme le montre la réforme de 2003 de la PAC en renforçant le principe de

conditionnalité de distributions des aides ou encore, le bilan de santé de la PAC en 2008 avec une allocation plus ciblée des fonds d'aide publique vers la protection des ressources naturelles (Chatellier et Guyomard, 2010). Ces réorientations des objectifs de l'agriculture sont également attendues par le citoyen-consommateur, de plus en plus demandeur de produits issus de pratiques en adéquation avec sa représentation des fonctions de l'agriculture (Lossouarn, 2003, Laisney, 2011) .

L'agriculture a ainsi, outre la fonction liée à la production primaire, des objectifs multiples tels que les fonctions environnementales et sociales (Landais, 1999, Laurent *et al.*, 2003). L'élevage laitier herbager en zone de montagne a de nombreux atouts face à ces nouvelles attentes (Bernuès *et al.*, 2011). De plus, ces systèmes de production peuvent offrir certains services, qui pourraient être rémunérés à l'avenir. En effet, dans le cadre du bilan de santé de la PAC de 2008, les états ont la possibilité de réaffecter jusqu'à 10% des aides directes du premier pilier sur certains objectifs identifiés comme l'environnement, la qualité et la commercialisation des produits ou encore une revalorisation de l'indemnisation des handicaps géographiques ou sectoriels et du paiement à l'hectare en zones défavorisées (Chatellier et Guyomard, 2010).

1.1.1.1 Services sociétaux

Les massifs montagnards sont historiquement des territoires d'élevage. Ces régions sont également souvent associées à un caractère et un profil paysager spécifique, valorisables au près de la société (touristes) et à une valeur d'héritage naturel (Bérard et Marchenay, 1998, Matthews *et al.*, 2006). L'élevage permet d'entretenir ces valeurs et ces profils paysagers. L'élevage permet ainsi de maintenir les paysages ouverts et vivants en limitant la reforestation (Casasus *et al.*, 2007, Camacho *et al.*, 2008, Réviron *et al.*, 2008), plus particulièrement au-delà d'une altitude où seuls l'élevage et l'exploitation forestière sont possibles (FAO, 2009). Les touristes et plus largement la société dans son ensemble sont en attente d'un meilleur cadre de vie, de paysages ruraux préservés, d'un paysage de « qualité » que l'élevage peut leur offrir (Bérard et Marchenay, 1995, Hervieu et Viard, 2001).

De façon générale, les consommateurs ont une image globalement positive de la production agricole en montagne. Depuis quelques décennies, les tendances de consommation alimentaire montrent que les consommateurs sont en recherche de produits alimentaires de qualité, de surcroît, issus d'une tradition ancrée dans un territoire, valorisant un savoir-faire local et possédant une histoire et une identité forte (Bérard et Marchenay, 1995, Brunschwig *et al.*, 2000, Laisney, 2011). Or la production laitière de certains massifs montagnards représente une part très importante dans la production labellisée à indication géographique comme ceux sous Appellation d'Origine Protégée (AOP) ou Indication Géographique Protégée (IGP) (Pflimlin, 2008). Par exemple, 80% de la production laitière livrée de Savoie est transformée en fromage à indication géographique (Chatellier *et al.*, 2006). Ces démarches de qualité présentes sur un territoire ont un rôle non négligeable dans le maintien voire la réactivation d'éléments

patrimoniaux et paysagers particuliers (Menadier, 2010). Ainsi les systèmes de production herbagers de montagne tendent globalement à être plus en adéquation avec les attentes des citoyens consommateurs, notamment dans le cadre des filières AOP ou IGP.

De plus, le maintien d'exploitations laitières sur les territoires montagnards permet de préserver également les filières associées et le tissu social dans un milieu rural parfois en situation de déprise. En effet, selon certains syndicats d'éleveur, la présence d'une exploitation représenterait sept emplois dans la filière amont ou aval (Groult, 2010). La préservation d'un bassin laitier actif permet également de favoriser une dynamique sociale autour des éleveurs (encadrement technique, formations, collectifs actifs) et d'éviter l'isolement social des agriculteurs (Paradis et Sarrazin, 2010).

1.1.1.2 Services environnementaux

Les systèmes herbagers présentent des atouts considérables pour l'environnement. Les prairies, et notamment les prairies permanentes prédominantes dans les systèmes laitiers de montagne, présentent une diversité botanique certaine, permettant d'en assurer la préservation (Pflimlin, 2008). En effet, les prairies permanentes se trouvent parmi les écosystèmes terrestres les plus riches de la zone tempérée (Bérard et Marchenay, 1998, Huyghe, 2009). La biodiversité des écosystèmes prairiaux, hormis la production fourragère, rend de nombreux services. Elle permet au système fourrager d'être source d'évolution, plus résilient face aux aléas climatiques (INRA, 2009, Martin, 2009). Or la diversité botanique est favorisée par le pâturage et la fauche jusqu'à un seuil optimal. Au-delà, lorsque les chargements et la pression de fauche sont trop importants, la biodiversité décroît (Jouven *et al.*, 2007). Le dimensionnement faible des unités laitières en montagne comparativement aux unités de plaine permettrait ainsi de favoriser la diversité botanique des écosystèmes prairiaux. Néanmoins, cet impact favorable est à relativiser lors de la comparaison des systèmes d'élevage en montagne entre eux, les systèmes laitiers étant plus intensifs (Orth *et al.*, 2009). La biodiversité est souvent mise en exergue par les démarches de qualité telles que les AOP. Favoriser la biodiversité des écosystèmes prairiaux est même un argument principal justifiant la mise en place de l'indication géographique aux yeux des organisations internationales régulant le commerce (Gueringer *et al.*, 2010). Néanmoins, même si les liens entre AOP et diversité botanique ne sont pas aussi avérés (Gueringer *et al.*, 2010), cette diversité participe à l'élaboration de la qualité du fromage produit agissant sur la flaveur, la texture (Coulon *et al.*, 2005, Farruggia *et al.*, 2009, Martin *et al.*, 2009, Farruggia *et al.*, 2010).

En outre, les prairies, et principalement les prairies permanentes, non labourables, permettent le piégeage du carbone dans le sol et limitent ainsi les émissions de gaz à effet de serre (Pflimlin, 2008, FAO, 2009, Soussana *et al.*, 2010). Elles participent également à la préservation des qualités de l'eau (limitation du lessivage de l'azote) et

du sol (limitation de l'érosion) sous réserve d'une conduite adaptée (Pflimlin, 2008, Huyghe, 2009).

1.1.2 Un besoin de se démarquer du marché national en valorisant l'herbe et la qualité

Le contexte économique et politique actuel est incertain, marqué par une réforme profonde de la Politique Agricole Commune (découplage intégral des aides directes en 2012, abandon des quotas laitiers à l'horizon 2015) et par une très grande volatilité des prix, des matières premières comme du lait (Chatellier et Guyomard, 2010, Bernuès *et al.*, 2011, Jeanneaux *et al.*, 2011). Pour subsister, les exploitations laitières herbagères de montagne, moins compétitives que celles de plaines, doivent se démarquer du marché national. Deux stratégies principales sont fréquemment utilisées : maintenir les coûts de production faibles et valoriser la production par la qualité.

La recherche d'un plus grand degré d'autonomie à l'échelle de l'exploitation permet de s'affranchir des fluctuations du prix des intrants tels que les fertilisants, les aliments concentrés ou les fourrages en limitant leur usage. Tendre vers un système plus économe et autonome conduit aussi à mieux valoriser et à optimiser le potentiel productif des différentes composantes du système de production : prairies et troupeau. Un des leviers possibles pour atteindre cet objectif d'autonomie est l'augmentation de la part du pâturage dans le système fourrager. En effet, l'alimentation est un poste prépondérant dans les coûts de production. Or l'herbe pâturée est le fourrage le plus intéressant économiquement comparativement aux fourrages conservés et aux aliments concentrés (Dillon *et al.*, 1995, McCall et Clark, 1999, Chénais *et al.*, 2001, Poetsch, 2007). Cependant, cette marge de manœuvre peut-être limitée du fait d'une saison de végétation plus courte qu'en plaine.

La stratégie de maintien des coûts de production bas à travers un système plus économe est également présente au sein des démarches de qualité comme les AOP. Les cahiers des charges AOP imposent un contrôle des coûts de production (Jeanneaux *et al.*, 2011) à travers plusieurs contraintes comme la limitation des quantités d'aliments concentrés ou de la production laitière, la constitution de la ration fourragère de base, un temps de pâturage minimum. Ces démarches de qualité valorisent l'origine et la typicité d'un produit (Brunschwig *et al.*, 2000) et de ses caractéristiques à travers un mode de production qui garantit le lien au territoire et qui le différencie aux yeux des consommateurs (Bérard et Marchenay, 1998, Barjolle et Sylvander, 2003, Thenard *et al.*, 2007). S'inscrire dans une démarche de valorisation de la production par la qualité permet de se démarquer du marché national et de s'affranchir de la baisse tendancielle du prix du lait (Chatellier et Delattre, 2003, Bernuès *et al.*, 2011, Jeanneaux *et al.*, 2011).

1.2 Elevages laitiers herbagers de montagne : des systèmes plus sensibles aux événements climatiques

Les événements climatiques se déclinent sous deux formes principales (Moreau et Lorgeou, 2007, FAO, 2009) :

- ◆ Les événements ponctuels ou aléas climatiques dits exceptionnels et remarquables par leur intensité, leur rareté et leurs impacts significatifs sur les milieux (Smith, 2011a).
- ◆ Les événements révélateurs de tendances climatiques. Ils sont de moindre ampleur par rapport aux événements extrêmes mais plus récurrents et prévisibles (Moreau et Lorgeou, 2007, Smith, 2011b).

Il est reconnu selon les experts (IPCC, 2007), que le changement climatique implique une augmentation de la fréquence et de l'amplitude des événements climatiques extrêmes se traduisant par des sécheresses sévères, des périodes de fortes précipitations accompagnées d'inondation et des vagues de chaleurs (Smith, 2011a).

Ces événements climatiques ont ainsi un impact direct sur les systèmes de production agricoles et en particulier les élevages laitiers de montagne (FAO, 2009, Sérès, 2010). En effet, étant des milieux faiblement artificialisés reposant sur la production et la consommation de l'herbe, ils sont extrêmement dépendant de l'environnement et donc, sensibles aux variations climatiques (Lemaire et Pflimlin, 2007, Blanc *et al.*, 2008, Nettier *et al.*, 2010). La sensibilité aux variations climatiques est d'autant plus prégnante que les systèmes subissent des contraintes, qu'elles soient de production ou pédoclimatiques (Faidherbe *et al.*, 2007, Lemaire et Pflimlin, 2007, Farruggia *et al.*, 2009). En effet, restreindre l'usage des intrants (apports azotés), interdire les fourrages humides ou l'affouragement en vert comme certains cahiers des charges AOP (Comté, Saint-Nectaire, Beaufort...), imposer l'autonomie fourragère à l'échelle de la zone AOP, imposer une composition de la ration de base minimale sont autant de limites d'action pour faire face au manque d'herbe. Par exemple, l'impact de la sécheresse de 2003 sur le bilan fourrager des systèmes herbagers en France a été atténué par une bonne repousse d'herbe et l'allongement de la période de pâturage en automne. Or ce rebond de production fourragère n'a pas eu lieu en montagne en raison des conditions climatiques (Lemaire et Pflimlin, 2007).

Les aléas climatiques affectent donc les performances du système de production dans son ensemble : altération de la productivité des prairies, récoltes perturbées avec des conséquences directes sur la qualité et la quantité des fourrages conservés, période

de pâturage aléatoire... (Sérès, 2010). En outre, l'évolution du climat implique également des modifications du pilotage du système de production par les éleveurs avec par exemple une mise à l'herbe plus précoce ou une rentrée à l'étable plus tardive. Une étude conduite par Moreau et Lorgeou (2007) montre que la mise à l'herbe est avancée en moyenne de 16 jours sur la période 1990-2005 comparativement à la période 1975-1990 à Pontarlier (Doubs). Selon cette étude prospective (Moreau et Lorgeou, 2007), les tendances climatiques ne seraient pas forcément défavorables au rendement annuel des prairies du Massif Central mais la production de biomasse serait très affectée en été avec un rendement nul quatre années sur cinq. Ces perturbations du système fourrager affectent de ce fait les performances du troupeau laitier à travers une baisse de la production laitière et de l'état corporel et sanitaire des animaux. Ces effets sur le troupeau se répercutent sur le long terme. Par exemple, selon Lemaire et Pflimlin (2007), la collecte laitière nationale a accusé une baisse généralisée au printemps 2004 ; cette baisse fait suite à une augmentation importante du taux de réforme en 2003 afin de réduire la taille du cheptel ou en réponse à des problèmes sanitaires et de reproduction. De surcroît, la qualité des produits, particulièrement les produits AOP ou IGP, peut être impactée. En effet, ces produits revendiquent à travers leurs cahiers des charges une combinaison non reproductible entre le milieu naturel, le sol et le climat, les plantes et les animaux, et le savoir-faire humain, qui crée leur typicité unique (INRA, 2009). En cas de perturbation d'une de ces composantes, tout l'équilibre de ces systèmes peut être ébranlé et remis en question.

1.3 Hypothèse et stratégie de recherche

Les élevages bovins laitiers de montagne sont ainsi au cœur d'enjeux sociétaux et environnementaux et présentent des atouts certains (Figure 2) confortant la nécessité de maintenir ces systèmes dans le paysage agricole français.

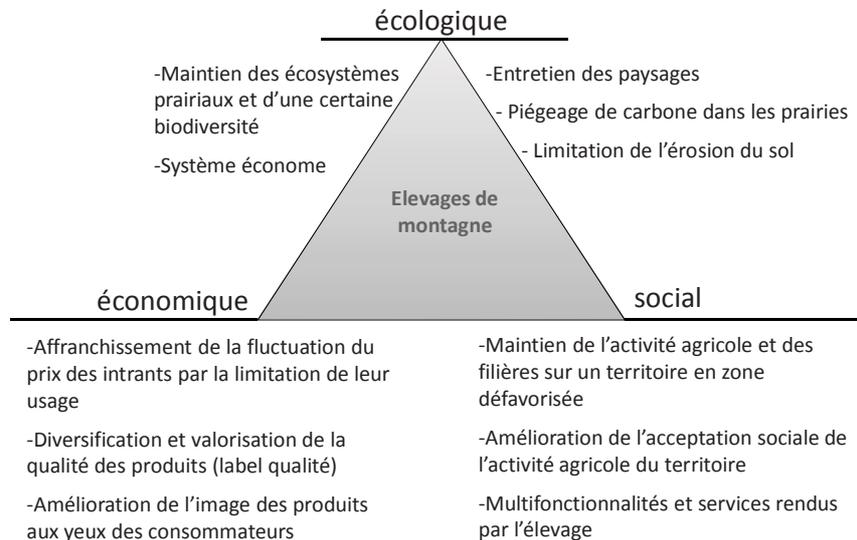


Figure 2 : Atouts et caractéristiques des systèmes laitiers herbagers situés en montagne (figure inspirée par Landais *et al.*, 1999 ; Poetsch, 2007)

Afin de maintenir leur durabilité économique, les élevages sont contraints de palier leur moindre compétitivité face aux systèmes de plaine et de zones intermédiaires. Les stratégies possibles pour y parvenir sont : maintenir des coûts de production faibles et diversifier leur production en valorisant la qualité et la relation du produit au terroir, à travers des filières de qualité.

Dans le cadre de cette thèse, les éléments importants que nous retenons parmi les différents leviers pour parvenir à ces stratégies sont :

- ♦ tendre vers un système de production plus économe en intrants et rechercher une plus grande autonomie alimentaire et fourragère à l'échelle de l'exploitation
- ♦ valoriser de façon optimale les ressources en prairies
- ♦ adapter la gestion du troupeau laitier en fonction des objectifs de production

Néanmoins, tendre vers un plus grand degré d'autonomie en optimisant l'utilisation des surfaces fourragères ne doit pas se faire au détriment de la biodiversité de l'écosystème prairial et de la repousse du couvert herbager après usage. De la même manière, un système plus économe en intrants ne doit pas porter préjudice à la production laitière, en quantité mais aussi en qualité, fondamentale en cas de système adhérent à un cahier des charges. Un système plus économe ne doit également pas se faire au détriment de l'état corporel et sanitaire des animaux du troupeau.

Ainsi, pour que les élevages bovins laitiers soient durables, il est important de connaître quels sont les compromis qu'il est possible d'atteindre, dans un système sous contraintes, entre performances animales et maintien de ces performances, utilisation durable des ressources en prairies et alimentaires, et recherche d'une plus grande autonomie alimentaire et fourragère.

Dans ce contexte de changements et d'incertitudes, politiques, économiques, sociétales et environnementales, l'avenir et la durabilité des systèmes de production sont assurés par leur capacité à s'adapter à ces changements. Les capacités adaptatives d'un système de production sont définies par Dedieu et Ingrand (2010) selon « leurs capacités à résister à un ensemble hétérogène de perturbations sur le moyen terme et à s'inscrire dans une dynamique, un mouvement, qui permette de durer sur le long terme ».

Il est donc important d'étudier des capacités adaptatives des exploitations laitières sous contraintes pour maintenir les compromis qu'il est possible d'atteindre entre les différentes composantes du système de production face à des changements.

Le système de production des exploitations laitières est défini par le tryptique « homme, troupeau, ressources » et les interrelations entre ces composantes (Landais, 1998, Dedieu *et al.*, 2008). Selon Brossier (1987), citant les travaux de Norman, le système de production agricole est défini par une série d'éléments ou de composantes interdépendantes et agissant les uns sur les autres de façon complexe. Au cœur de ces interactions se trouve l'agriculteur. Le système de production d'une exploitation laitière spécialisée herbagère se confond, par définition, avec le système d'élevage, puisque l'ensemble de l'appareil de production est tourné vers la production laitière. Les ressources culturales, formant exclusivement le système fourrager, sont au service du troupeau laitier. Duru *et al.* (1988) repris par Coleno et Duru (1998) définissent le système fourrager comme étant l'ensemble des moyens et des règles de décisions que l'agriculteur mobilise pour ajuster les flux de production et de consommation des fourrages en vue d'atteindre un objectif de production.

Nous formulons l'hypothèse que les systèmes de production peuvent parvenir à trouver le compromis entre performances animales, utilisation durable des ressources et une plus grande autonomie alimentaire et fourragère en ajustant la demande et l'offre au sein des composantes du système. **En effet, une meilleure adéquation entre la dynamique annuelle des besoins du troupeau et les périodes de disponibilités herbagères et/ou les possibilités de récoltes et de stockage de fourrages doit permettre d'atteindre et d'améliorer ce compromis.** La répartition des besoins alimentaires des animaux déterminée par l'étalement de la production laitière est dépendante de la définition des objectifs de production par l'éleveur (distribution des vêlages au cours de l'année, caractéristiques zootechniques du troupeau).

Une meilleure adéquation entre les besoins alimentaires du troupeau et la production herbagère doit également favoriser les capacités adaptatives du système de production à faire face à des changements.

1.4 Définition des éléments étudiés lors de la thèse

Selon les éléments développés par l'hypothèse et la stratégie de recherche, nous nous concentrons sur les aspects biotechniques des systèmes de production, à savoir le fonctionnement des prairies et du troupeau laitier géré par l'éleveur. Ainsi, bien qu'étant des éléments importants de la durabilité de ces systèmes, les aspects sociétaux des services rendus par l'activité d'élevage et les aspects environnementaux tels que l'entretien du paysage, la séquestration du carbone dans les prairies, ne sont pas étudiés dans le cadre de cette thèse. En effet, nous avons choisi de ne pas prendre en compte directement les aspects sociétaux et économiques. Ce travail de thèse n'abordera pas certains éléments contextuels des systèmes herbagers laitiers situés en montagne présentés dans ce chapitre introductif (Figure 3).

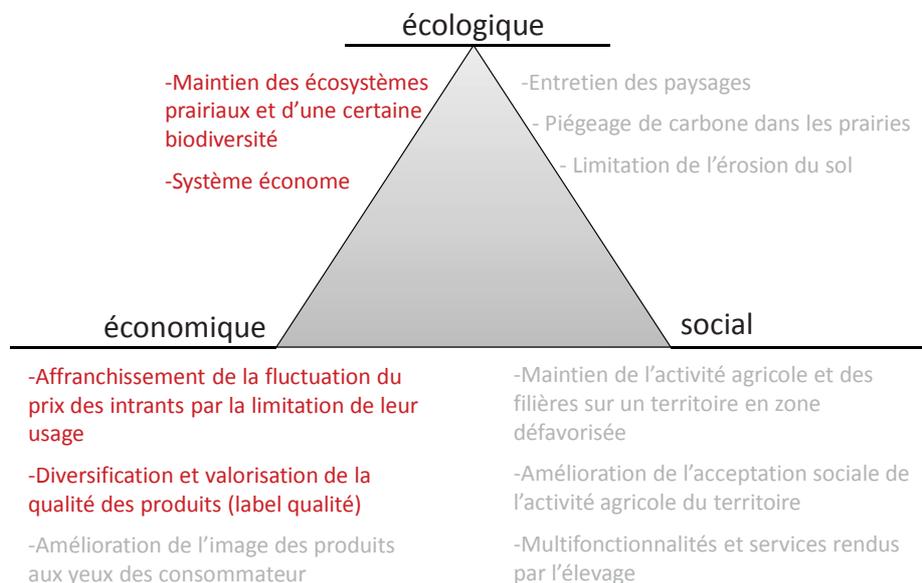


Figure 3 : Eléments abordés (en rouge) et non abordés (en gris) au cours du travail de thèse

CHAPITRE II

**2 APPROCHE SYSTEMIQUE ET
MODELISATION POUR L'ETUDE DE
L'AUTONOMIE A L'ECHELLE DE
L'EXPLOITATION**

2.1 L'autonomie comme composante de la durabilité

2.1.1 Cadre conceptuel

La notion de développement durable peut se définir communément comme « la capacité des générations présentes à répondre à leurs besoins sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs » (Brundtland, 1987). Depuis 1987, cette définition a été déclinée maintes fois, toutefois en conservant une base commune sur le besoin de prêter attention aux conséquences économiques, environnementales et sociales des choix de développement pour le présent comme pour le futur (Boyazoglu, 1998, Landais, 1998, Gibon *et al.*, 1999b). Par ailleurs, la durabilité est définie par la Convention sur la Diversité Biologique comme « *l'utilisation des composants de la diversité biologique d'une manière et à un niveau qui ne mène pas à long terme à la disparition de cette diversité biologique permettant ainsi de pouvoir subvenir aux besoins actuels et du futur* » (Thompson et Nardone, 1999, Hoffmann, 2011). Pour Landais (1998), une exploitation agricole durable se définit comme « *une exploitation viable, vivable, transmissible et reproductible* ».

La durabilité des systèmes peut être appréhendée par l'évaluation des systèmes de production déjà existants ou en concevant de nouveaux systèmes de production à travers des pratiques alternatives (von Wiren-Lehr, 2001). Evaluer la durabilité, que ce soit d'un système existant ou innovant, ne peut se faire qu'en se référant à des pratiques, des niveaux ou états d'éléments du système reconnus comme acceptables (von Wiren-Lehr, 2001). Toutefois, d'après Bernuès *et al.*, (2011), il convient de penser et d'analyser la durabilité selon les spécificités des systèmes de production au regard de leur grande diversité dans le paysage agricole français, européen ou même mondial.

Dans cette thèse, nous choisissons d'aborder la notion de durabilité des systèmes d'élevage herbagers bovins laitiers sous contraintes à travers un axe principal : **la recherche d'une plus grande autonomie alimentaire et fourragère à l'échelle de l'exploitation**. La diminution de l'utilisation des intrants tels que les aliments concentrés, l'utilisation des fourrages produits au sein de l'exploitation, l'augmentation de la part du pâturage dans le système d'élevage sont autant de leviers améliorant l'autonomie (Bernuès *et al.*, 2011). Au demeurant, ces leviers revalorisent également le lien au terroir de la production laitière. Or, cet ancrage territorial de la production est essentiel pour les exploitations sous label de qualité à indication géographique. Les moyens pour accéder à un plus grand degré d'autonomie alimentaire et fourragère ont également des conséquences directes sur la durabilité des systèmes (Poetsch, 2007) : préservation et augmentation de l'importance des prairies permanentes au sein du système assurant une conservation, voire une amélioration de la biodiversité prairiale (Rubin *et al.*, 2004, Poetsch, 2007) et séquestration du carbone (Soussana *et al.*, 2010), une moindre

sensibilité à la fluctuation des prix des intrants (Pavie et Retif, 2006, Bernuès *et al.*, 2011)...

Les systèmes herbagers bovins laitiers tendant vers une plus grande autonomie alimentaire et fourragère peuvent se rapprocher des systèmes agronomes économes de par leurs caractéristiques. Ces systèmes économes sont encore appelés « low input systems ». Ils sont définis comme ceux « *qui cherchent à optimiser le management et l'utilisation des ressources produites sur l'exploitation, à minimiser l'utilisation des ressources ou intrants produits en dehors de l'exploitation, quand c'est réalisable, afin de minimiser les coûts de production, limiter la pollution des eaux de surface et les nappes phréatiques, réduire les résidus pesticides dans les produits agricoles, amenuiser les risques globaux pour l'agriculteur, et augmenter la rentabilité du système à court et long terme* » (Parr *et al.*, 1990).

2.1.2 Principaux leviers pour améliorer l'autonomie fourragère et alimentaire

Nous avons fait un état des lieux des travaux de recherche sur l'autonomie alimentaire et fourragère dans les systèmes herbivores. Nous pouvons noter que les résultats de l'interrogation des bases de données bibliographiques au sujet de l'autonomie fourragère et alimentaire ne contiennent que peu d'articles internationaux. Les mots employés lors de ces requêtes ont été, entre autres, une association de « *self-sufficiency* » « *autonomy* » « *low input farming system* » croisés avec « *forage* » « *livestock* » « *cattle* » « *feed* ». Ces mots font ressortir surtout des travaux scientifiques français (Jouven *et al.*, 2008, Farruggia *et al.*, 2009, Veyssset *et al.*, 2009, Havet *et al.*, 2010, Martin *et al.*, 2011) et des travaux issus de pays en voie de développement (Calub *et al.*, 1996, Tiftonell *et al.*, 2009, Bouzida *et al.*, 2010). Néanmoins, quand nous associons les termes liés à l'agriculture biologique dans les requêtes comme « *organic dairy farming* » ou « *organic milk production* », de nombreux travaux internationaux traitent alors de la recherche d'autonomie alimentaire et fourragère (Kristensen et Kristensen, 1998, Mogensen, 2004, Flaten et Lien, 2009, Muller-Lindenlauf *et al.*, 2010). En effet, les systèmes laitiers biologiques vouent une part importante de la surface fourragère à la prairie, permanente ou temporaire (Pavie et Retif, 2006) et tendent vers une autonomie pour les aliments concentrés (autoconsommation de céréales) (Mogensen, 2004, Muller-Lindenlauf *et al.*, 2010).

Parmi les études recensées, deux axes se distinguent :

- 1^{er} axe : des analyses sur l'évolution des systèmes déjà considérés comme économes sur différents paramètres tels que les rendements et la productivité, la qualité des fourrages, les bilans fourragers, la biodiversité floristique et les paramètres économiques.
- 2^{ème} axe : des expérimentations, suivis de systèmes de production ou propositions pour atteindre un plus grand degré d'autonomie.

Selon une étude réalisée par Paccard *et al.*, (2003) sur 393 exploitations d'élevages bovins laitiers en France et leurs données comptables de l'année 2000 (données du Réseau d'Information Comptable Agricole, **RICA**) et techniques (structures, assolement, cheptel, système fourrager, achats de concentrés, fertilisation), les exploitations françaises ont, en moyenne, une autonomie alimentaire globale évaluée à 86,2% de la MS, mais une autonomie en aliments concentrés faible (32,1% de la MS) et variable selon les systèmes. Les systèmes en agriculture biologique sont plus autonomes avec 10 à 15% de plus que les conventionnels. Les systèmes herbagers de plaine ou de montagne sont un peu moins autonomes en concentrés que les exploitations ayant un système fourrager basé sur l'herbe et le maïs. Selon les résultats de cette étude, l'autonomie de la ration totale décroît avec le niveau d'intensification plus important et ce, d'autant plus que le système est spécialisé dans la production laitière. *A contrario*, l'étude menée en Pays de la Loire par Rubin *et al.* (2004) montre que les systèmes atteignant un taux d'autonomie globale supérieur à 95% sont les systèmes laitiers tout herbe, mais elle est souvent obtenue par une limitation de la production laitière. Ces résultats vont dans le même sens que les travaux de Mogensen (2004) qui ont montré que les productions laitières moyennes des systèmes biologiques sont en moyenne 9% plus faibles que celles des systèmes conventionnels, tandis que cette différence peut atteindre 20% en Suède et en Allemagne.

Les études liées au 1er axe sont, pour la plupart, issues de travaux de suivis de fermes commerciales, reconnues comme étant économes, ancrées soit dans un territoire comme Les Pays de la Loire (Rubin *et al.*, 2004), la Bretagne (Beranger, 1999) ou les montagnes autrichiennes de Styrie (Poetsch, 2007), soit abordées à une échelle nationale (Paccard *et al.*, 2003, Mogensen, 2004, Cousinie, 2010). Ces fermes appartiennent souvent à un réseau soumis à un cahier des charges, comme en France le **RAD** (Réseau d'Agriculture Durable), le **CIVAM** (Centres d'Initiatives français pour Valoriser l'Agriculture et le Milieu rural), le **CEDAPA** (Centre d'Etude pour un Développement Agricole Plus Autonome) (Beranger, 1999, Cousinie, 2010). La méthodologie utilisée lors de ces recherches est basée, en plus des suivis de réseaux de fermes sur plusieurs années, sur des enquêtes en exploitation, associées au recueil de données comptables (comme celles du **RICA**).

A partir de ces diverses études sur l'autonomie, nous pouvons discerner les déterminants de base des systèmes économes (Rubin *et al.*, 2004, Poetsch, 2007, Cousinie, 2010) :

- la réduction de l'utilisation des ressources externes telles que les intrants (aliments, agrofournitures, énergie, eau)
- l'augmentation de la part du pâturage dans le système d'élevage
- l'optimisation des aspects attenants à l'élevage des animaux

- la simplification des techniques culturales
- l'optimisation de la praticité des bâtiments et du système de stabulation
- la réduction des coûts des équipements de l'exploitation

Néanmoins, Rubin *et al.* (2004) notent que les conditions de mise en œuvre de ces déterminants pour tendre vers un système plus autonome dépendent activement de la structure agro-physique de l'exploitation (possibilité de culture de protéagineux, productivité des prairies, accessibilité des parcelles pour le pâturage des vaches laitières, surface suffisante pour le pâturage et les récoltes de fourrages...).

Selon les études du 2ème axe recensées, certaines pratiques associées aux déterminants décrits ci-dessus permettent au système de production d'accéder à un plus grand degré d'autonomie à l'échelle de l'exploitation. Seules les pratiques adaptables aux systèmes herbagers ont été ici prises en compte :

- Diminution de l'utilisation des ressources externes à l'exploitation

Les leviers possibles sont alors l'amélioration de la qualité des fourrages, une plus grande diversité botanique des prairies, l'entretien mécanique et biologique des parcelles, la diminution du chargement global du troupeau (Adams *et al.*, 1996, Curtis *et al.*, 2008, Aubron *et al.*, 2010).

- Gestion du troupeau

Rationaliser et adapter la conduite du troupeau de manière à diminuer le taux de renouvellement des animaux, augmenter la carrière des femelles ou encore sélectionner des races plus adaptées aux conditions pédoclimatiques sont autant de voies possibles pour accéder à des systèmes plus économes (Espinasse *et al.*, 1997).

- Augmentation de l'importance du pâturage dans le système d'élevage

Synchroniser la période des vêlages de manière à ajuster la production laitière avec la pousse de l'herbe est présenté comme étant un levier permettant d'augmenter la part du pâturage au sein du système d'élevage (Adams *et al.*, 1996, Leesburg *et al.*, 2007, Poetsch, 2007). A l'opposé de cette solution, certains auteurs américains proposent un système adapté aux états du Midwest des Etats-Unis où les vêlages sont groupés à l'automne afin d'améliorer la reproduction du troupeau. Ils préconisent alors le pâturage au fil en automne et en hiver sur des parcelles de fétuque élevée dans le but de réduire le surcoût alimentaire induit par les importants besoins en lactation (Curtis *et al.*, 2008, Dierking *et al.*, 2008, Scaglia *et al.*, 2008). Une autre marge de manœuvre présente dans la littérature est la diminution des apports de concentrés et l'instauration d'un pilotage du pâturage plus sévère permettant de maximiser l'ingestion au pâturage (Peyraud et Delaby, 2005). Cependant, remettre le pâturage et l'herbe au cœur du système d'élevage implique d'accepter une variabilité de la quantité d'herbe offerte mais aussi de sa qualité, et donc d'accepter de ne plus maîtriser les rations comme en

période hivernale et de ne pas accéder en permanence à la maximisation de la production animale (Moulin *et al.*, 2001).

L'ensemble des marges de manœuvre présentées pour accéder à un système herbager plus autonome peut donc être étudié au niveau du système de production global pour connaître les impacts sur les différentes composantes du système. Par ailleurs, nous pouvons noter que les études menées sur le terrain, les expérimentations « systèmes » ou les travaux d'enquêtes évaluent uniquement les impacts d'un système économe et autonome ou d'un système en recherche d'un plus grand degré d'autonomie selon quelques variables ou indicateurs précis (Aubron *et al.*, 2010). Ainsi Poetsch (2007) évalue l'impact des systèmes économes en utilisant les bilans azotés et énergétiques à l'échelle de l'exploitation (fertilisants minéral, organiques, biomasse énergétique et protéique consommée) comme seuls indicateurs sur les aspects environnementaux. Les études utilisant ce type de méthodologie montrent qu'elles ont un champ d'investigation limité et qu'elles ne permettent pas d'acquérir une réelle vision de l'évolution et des impacts sur le système dans son ensemble.

2.2 Autonomie et adaptabilité des systèmes aux perturbations

Un autre aspect développé dans la définition de la durabilité est la répétabilité et la pérennité du système. L'utilisation d'une ressource est considérée durable quand elle est planifiée et répétable à long terme, et peut faire face à des aléas (Thomson et Nardone, 1999). Or les systèmes herbagers qui recherchent l'autonomie sont dépendants des facteurs environnementaux du fait de leur faible artificialité (Blanc *et al.*, 2010a). Pavie et Retif (2006) ont montré notamment que les systèmes laitiers en agriculture biologique avaient des résultats économiques plus sensibles aux aléas climatiques qu'aux fluctuations des prix.

Les perturbations du système peuvent prendre la forme de variations normales, de chocs, de cycles ou de tendances à moyen et long termes (Dedieu *et al.*, 2008). Dans le cadre de cette thèse, nous nous limiterons aux perturbations dues à des changements des contraintes de production ou à des aléas climatiques tels que les années climatiques remarquables. Elles sont alors assimilées à des chocs. Pour évaluer les capacités adaptatives d'un système face à des perturbations, il faut pouvoir évaluer sa capacité à absorber les chocs, à prendre en compte le déséquilibre du système de façon à maintenir sa propre finalité (Folke, 2006).

Selon Sauvant et Martin (2010), lorsqu'une perturbation ou contrainte est appliquée à un système en équilibre (Figure 1), le système enregistre et réagit à cette contrainte après un délai ou phase d'incubation. Cette réaction ou réponse est définie par une amplitude dépendant directement de l'intensité du déséquilibre imposé au système et de son degré de résistance.

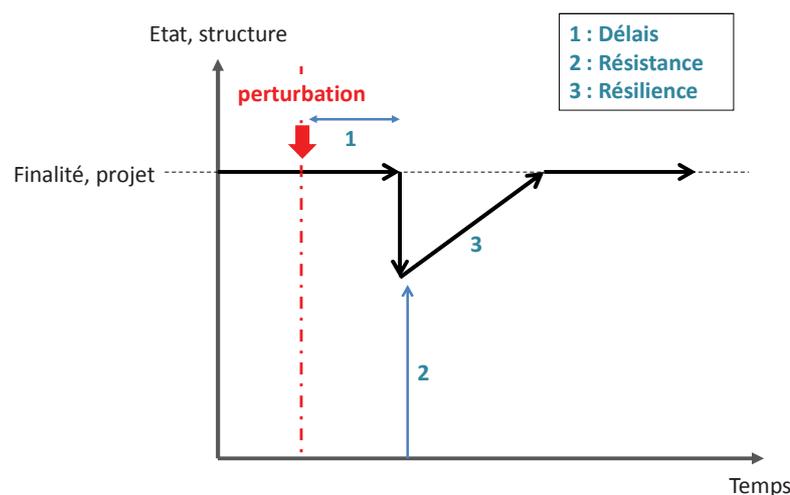


Figure 1 : Réponse dynamique d'un système à une perturbation
(figure proposée par Sauvant et Martin (2010))

En fonction de la nature de cette réaction, les modalités d'adaptation des systèmes sont définies par Sauvant et Martin (2010) : rigides, élastiques, flexibles ou

plastiques comme l'illustre la Figure 2. La contrainte appliquée au système n'agit pas sur un système rigide, la structure et la finalité du système restent invariantes. Cependant, en cas de perturbation trop forte, une situation de rupture peut arriver. Un système élastique subit la contrainte en déformant temporairement sa structure pour converger à nouveau vers sa finalité. Un système flexible s'adapte à la déformation induite par la contrainte en changeant soit sa finalité, soit sa structure, tandis qu'un système plastique adaptera sa structure selon un nouveau projet. Ces différentes modalités de réaction permettent d'aboutir à des systèmes stables (la finalité n'évolue pas), à des situations de rupture ou encore à l'émergence de créativité, d'innovations (reformulation de nouveaux systèmes ayant de nouvelles finalités) (Folke, 2006, Burkhard *et al.*, 2011). Dans le cadre de notre étude, nous nous intéresserons uniquement aux systèmes capables de maintenir leurs finalités en cas de perturbations.

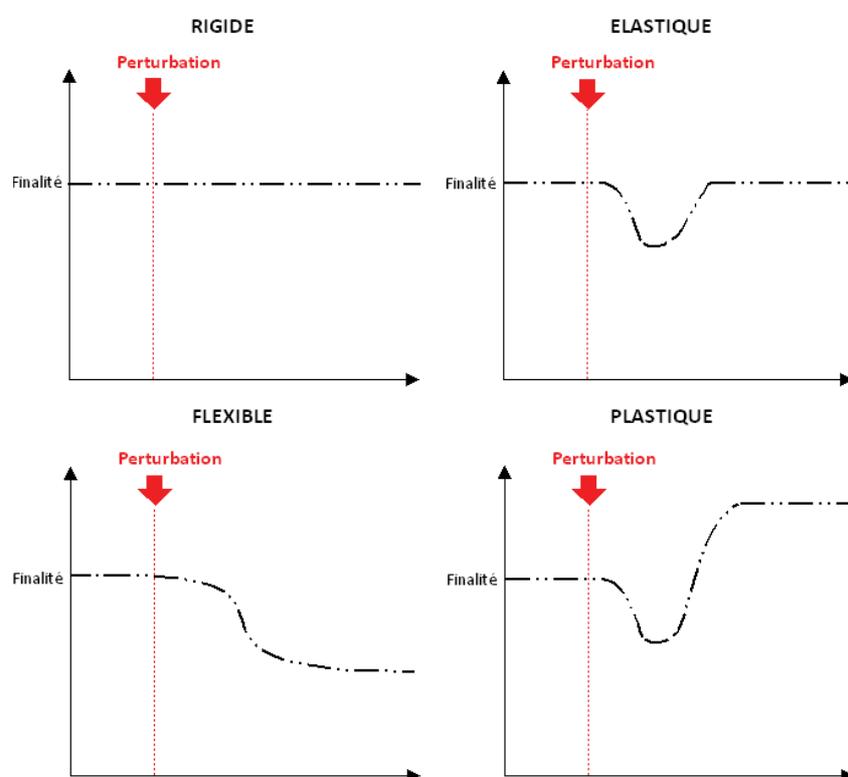


Figure 2 : Modalités des réponses dynamiques d'un système suite à une perturbation (figure proposée par Sauvant et Martin (2010))

Les capacités d'adaptation d'un système face à une perturbation dépendent des capacités adaptatives des différents composants de ce système et de leurs interrelations.

Selon Dedieu *et al.*, (2008), les composantes des systèmes d'élevage permettant de faire face aux aléas et perturbations sont :

- Les éléments biophysiques : (les couverts herbacés et les animaux d'élevage)
- Le management de l'éleveur : (les modalités de gestion de la diversité des ressources fourragères et des trajectoires productives des animaux)

- Les informations liées aux processus de production comme celles en provenance de l'environnement
- Les pratiques de production comme les pratiques économiques et commerciales
- Les compétences, savoir-faire et réseaux des éleveurs

Comme Dedieu *et al.*, (2008) l'énoncent, les capacités adaptatives du système global dépendent également de celles développées par les différents sous-systèmes. Ainsi, pour Duru *et al.*, (2008), la conduite des prairies est une source de flexibilité. Elle peut se décliner selon deux axes principaux :

- La fréquence et l'intensité de défoliation (valorisation des ressources herbagères). Les pratiques des agriculteurs sur les parcelles (fertilisation, type de fauche, période de fauche) ou de conduite du pâturage (déprimage, intensité de pâturage, nombre de passages d'animaux sur une parcelle, temps de repousse) sont autant de leviers d'action pour accéder à une plus grande flexibilité de la valorisation des ressources herbagères (Delaby *et al.*, 2001, Hardy *et al.*, 2001, Peyraud et Delaby, 2005, Duru *et al.*, 2008)
- La capacité à utiliser la diversité de la composition en espèces graminées. D'après Martin (2009) et Duru *et al.*, (2008), plus la diversité botanique est grande, induisant une diversité fonctionnelle végétale importante, plus la production de biomasse est étalée au cours de la saison de pâturage et plus la dynamique décroissante des valeurs nutritives de l'herbe est lente

Les capacités adaptatives du système d'élevage dépendent également des potentiels adaptatifs des animaux du troupeau et, plus particulièrement, des femelles puisqu'elles sont les éléments productifs du troupeau (Blanc *et al.*, 2004).

Cette capacité adaptative se traduit principalement par l'aptitude à pouvoir reconstituer et mobiliser les réserves corporelles. En effet, les animaux doivent être à même de valoriser les ressources fourragères quand elles sont abondantes et de supporter les périodes de restriction à moindre coût zootechnique (Blanc *et al.*, 2008, Blanc *et al.*, 2010a), de surcroît en élevage extensif. Cette aptitude à valoriser les ressources fourragères s'exprime par le comportement animal et les processus physiologiques. Ainsi, l'animal doit par exemple être apte à rechercher et sélectionner les couverts herbacés à consommer au pâturage, parfois en condition de ressources peu abondantes (Dumont *et al.*, 2001, Blanc *et al.*, 2008). Les réponses physiologiques déterminent les processus de mobilisation des réserves corporelles et de reconstitution. Par exemple, les femelles à haut potentiel productif voient leurs performances reproductives affaiblies du fait d'une mobilisation des réserves corporelles importantes déterminée par les besoins de la mamelle impliquant des troubles lors de la reprise de la cyclicité ou lors de l'expression des chaleurs (Disenhaus *et al.*, 2005). De surcroît, une restriction alimentaire lors des premières semaines de lactation peut entraîner une diminution du rendement laitier, mais surtout conduire à une dégradation des performances reproductives (de Vries et Veerkamp, 2000, Disenhaus *et al.*, 2005). A

contrario, une suralimentation dans les dernières semaines de gestation avec un état d'engraissement trop important comparativement aux animaux moins bien alimentés sur cette même période, mène à une capacité d'ingestion plus limitée, une mobilisation des réserves corporelles plus conséquente et un rendement laitier plus faible (Remppis *et al.*, 2011). Par ailleurs, une période de restriction alimentaire peut être utile pour certains systèmes tels que le phénomène d'animal « accordéon » (Bocquier et Gonzalez-Garcia, 2009, Blanc *et al.*, 2010b). En effet, pendant l'élevage des génisses, une croissance non linéaire induite par des périodes de restrictions alimentaires faibles et des périodes de réalimentation, aboutit à un meilleur taux de croissance sur toute la période d'élevage mais aussi à de meilleures performances laitières lors de la première lactation, de meilleures performances reproductives et à une meilleure longévité de la carrière (Le Cozler *et al.*, 2009, Blanc *et al.*, 2010b).

Ainsi, les animaux ont démontré leurs capacités à pouvoir s'adapter face aux périodes de restriction alimentaire sans subir de pénalités quant à leurs performances productives ou reproductives. Ces capacités peuvent permettre au système de persister en cas de perturbations des ressources herbagères. Mais elles peuvent être également utilisées et rationalisées dans l'organisation même du système afin de réaliser des économies de fourrages et d'aliments concentrés.

2.3 Approche systémique et modélisation

2.3.1 L'exploitation agricole vue comme un système complexe

La recherche d'une plus grande autonomie alimentaire et fourragère nécessite de prendre en compte tous les éléments du système de production, leur fonctionnement propre, mais aussi leurs interactions : les prairies, les ressources alimentaires, le troupeau et surtout, l'éleveur appliquant une stratégie et un pilotage en accord avec ses objectifs de production. Une exploitation agricole n'est en effet pas que le fruit de l'addition de moyens et techniques de production, ou la juxtaposition d'ateliers de production (Osty, 1977, Brossier, 1987). Ainsi, une démarche analytique, avec un découpage en plusieurs enchaînements de causalités, ne permet pas, seule, de donner des éléments de réponse à notre problématique. Le système de production d'une exploitation agricole peut être appréhendé comme étant un système complexe (Gibon *et al.*, 1999a, von Wiren-Lehr, 2001, Laurent *et al.*, 2003, Le Gal *et al.*, 2010).

Brossier (1987) ainsi que Coquillard et Hill (1997) définissent le système comme un ensemble (ou collection) d'éléments (ou objets) en interactions dynamiques organisés en fonction d'une finalité. Cette définition est issue directement des travaux sur la théorie des systèmes généraux, développée, entre autres, par von Bertalanffy (1969) ou Le Moigne (1977). Ce dernier définit le système comme : « *un objet qui, dans un environnement, doté de finalités, exerce une activité et voit sa structure interne évoluer au fil du temps, sans qu'il perde pourtant son identité unique.* ». Un système est donc caractérisé par sa structure, son activité et son évolution. La structure du système est définie en d'autres termes comme la charpente du système. Selon Edgar Morin, la structure s'en tient aux invariants et aux règles de transformation à partir de ces invariants (Lerbet, 1984). L'activité du système, à l'origine des règles de transformation en son sein, est déterminée par la finalité du système. C'est la résultante de l'activité de chaque composant du système (propriétés sommatives), mais aussi des propriétés ou qualités émergentes inhérentes aux interactions entre ces différents composants (Rigolot, 2009). Une autre notion importante dans cette définition est l'évolution. En effet, l'analyse des systèmes permet d'introduire une perspective temporelle (Moisan, 1977), afin de comprendre l'évolution de la structure interne du système en fonction des interactions dynamiques entre ces composants au cours du temps. Concevoir l'exploitation agricole comme un système permet également d'introduire les contraintes afférentes au sein du système (Moisan, 1977) et de prendre en compte leur impact dans le fonctionnement du système.

Selon Lerbet (1984), un système est une **représentation de la réalité selon un point de vue**. Le monde réel peut être ainsi décrit comme un entremêlement de systèmes avec leurs finalités, leurs activités et leurs structures propres (Rigolot, 2009). Par conséquent, nous pouvons représenter l'exploitation agricole comme un système complexe tel qu'illustré dans La Figure 3.

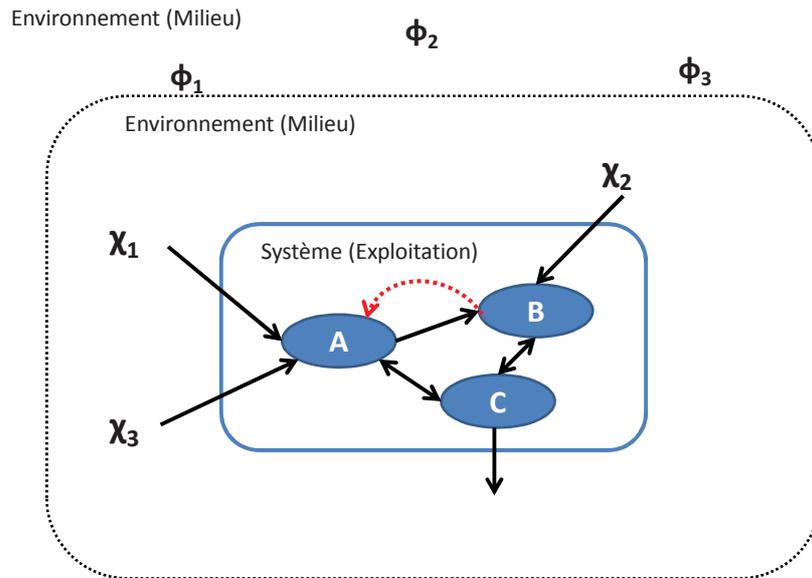


Figure 3 : Représentation de l'exploitation agricole comme un système, composé de sous-systèmes identifiés (A, B et C)

Dans un premier temps, il faut situer l'objet d'étude en délimitant son espace intérieur et en le distinguant de son espace extérieur. L'action même de délimiter les frontières du système étudié en fonction d'un problème permet de créer le système et de le différencier de la réalité (ten Napel *et al.*, 2011). Dans notre exemple, les frontières du système sont situées par l'exploitation agricole en tant que telle. Le système contient des éléments, agissant les uns sur les autres par le biais d'actions directes ou de régulations, (symbolisés respectivement par une flèche noire ou rouge en pointillés). Ces éléments ou sous-systèmes sont définis comme des entités qui, au sein du système général, fonctionnent de façon apparemment autonomes, mais entretiennent des relations avec le reste du système général (Coquillard et Hill, 1997). Le troupeau, les parcelles, les bâtiments peuvent être considérés, par exemple, comme des sous-systèmes. Une exploitation laitière ne peut être envisagée comme un système fermé, puisqu'elle échange matière, énergie et information avec son environnement ou milieu extérieur (Coquillard et Hill, 1997, ten Napel *et al.*, 2011). En effet, comme nous l'avons développé dans le chapitre 1, le système de production se situe au milieu d'un contexte, d'un environnement. Ce milieu extérieur est décrit par des facteurs qui peuvent être, entre autres, d'ordre abiotiques (facteurs climatiques, édaphiques, topographiques...), sociétaux (attente spécifique du citoyen-consommateur...), économiques (prix du lait ou des intrants...). Selon la représentation du système conformément au point de vue choisi, certains facteurs sont en interaction directe et agissent sur l'exploitation en elle-même et sur ses composantes alors que d'autres non. Ces facteurs sont considérés comme des « entrées » du système (ten Napel *et al.*, 2011). De même, par ses « sorties », le système agit sur le milieu extérieur (ten Napel *et al.*, 2011). Dans la Figure 3, nous avons symbolisé les facteurs agissants par χ et les autres par ϕ . Cette distinction apporte ainsi une deuxième frontière dans la représentation du système (Sauvant,

2007). Sur la Figure 3, nous n'avons pas pu représenter la finalité du système, ni son évolution au cours du temps, mais seulement son état à un instant t , matérialisant l'ensemble des sous-systèmes, caractéristiques et activités qui le composent à cet instant (Coquillard et Hill, 1997, ten Napel *et al.*, 2011).

2.3.2 Du système au modèle puis au simulateur

Le système matérialisé peut se décliner en un (ou des) modèle(s) représentant un aspect du système étudié. Un système peut s'analyser selon différents angles disciplinaires, questions de recherche, objectifs, etc., impliquant une diversité de modèles (Lerbet, 1984, Gouttenoire *et al.*, 2011).

D'après Landais et Balent (1993), utiliser un modèle permet de réduire la complexité du système afin de l'étudier selon un aspect choisi comme le montre la Figure 4. Selon Sauvant (1992) citant Spedding (1988), le terme modèle peut se définir comme : *“an abstraction of the real world, specified so as to capture the principal interactions and behavior of the system under study and capable of experimental manipulation in order to project the consequences of changes in the determinants of the system's behavior”*. Cette définition est reprise sous cette forme ou une forme voisine par de nombreux auteurs tels que Coquillard et Hill (1997), Peck (2004)...

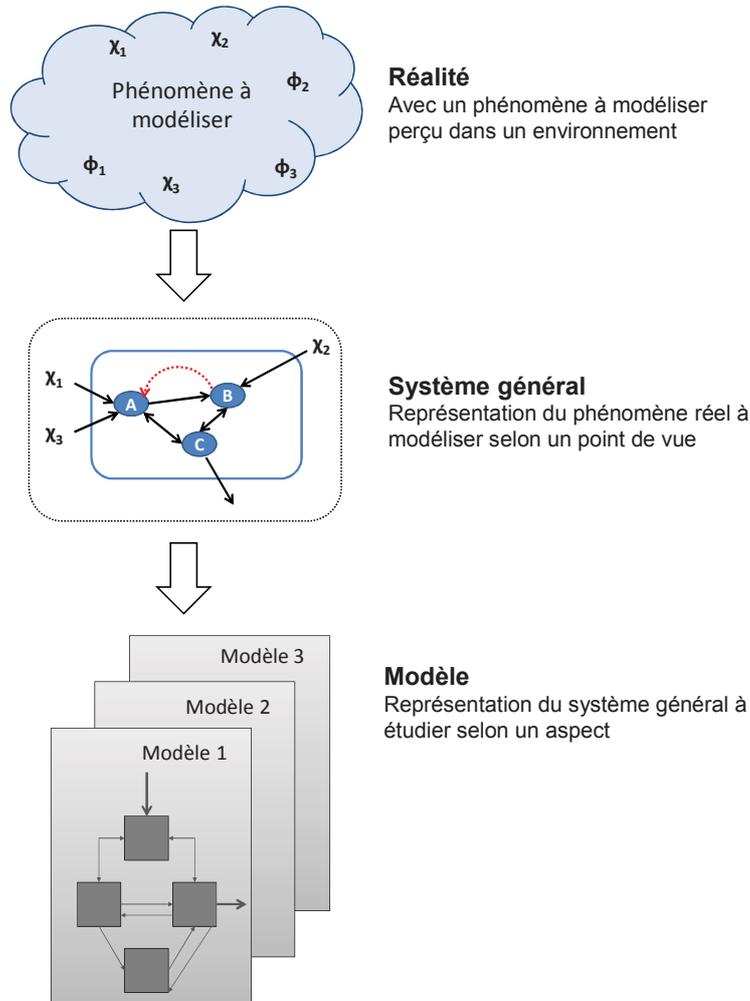


Figure 4: démarche de modélisation, conceptualisation et représentation de la réalité en système complexe
 [Schéma inspiré des travaux de Le Moigne (1984) et Sauvart (2007)]

La difficulté principale de la construction d'un modèle est de simplifier le système complexe auquel il se rapporte, tout en restant fidèle à sa structure et aux processus. Ce challenge ne peut être relevé qu'en effectuant une profonde réflexion sur les éléments et processus du système qui doivent être inclus dans le modèle, sur les niveaux d'abstraction et de simplification qu'il faut atteindre et sur les compromis à faire... (Cros *et al.*, 2003, Peck, 2004). En cela, la démarche de modélisation permet d'apporter une aide conceptuelle et méthodologique pour résoudre un problème en formulant et conceptualisant un problème (Brossier, 1987, Borshchev et Filippov, 2004, Peck, 2004). Elle permet d'aborder un problème concret, ici, la recherche d'autonomie fourragère et alimentaire à l'échelle de l'exploitation, tout en maintenant des niveaux de production et des performances animales satisfaisants, et en utilisant durablement les ressources.

Outre le fait que formaliser un modèle demande de simplifier, synthétiser et analyser le système général et la problématique associée, modéliser permet de prendre en compte les interactions au sein des composantes du modèle, d'en révéler les

propriétés émergentes, et de les explorer. La modélisation est une des rares méthodes permettant d'analyser ces propriétés émergentes, inaccessibles par des approches réductionnistes (Coquillard et Hill, 1997, Moulin *et al.*, 2004, Jouven *et al.*, 2008). Les modèles permettent également de se rendre compte d'un manque de connaissances, ou d'un échelon manquant nécessaires à la construction du modèle. Par exemple, le système de rationnement des animaux s'est largement basé sur la couverture des besoins évalués selon le potentiel génétique des animaux de façon à maximiser leur productivité conformément à des lois de réponses établies empiriquement (Sauvant, 1992). Il convient donc d'établir de nouvelles lois de réponses prenant en compte d'autres objectifs que la maximisation des productions laitières telles que la limitation des impacts environnementaux, la préservation des réserves corporelles pour la reproduction, l'amélioration de la qualité du lait (Sauvant, 1992, Rossing *et al.*, 1997). Par exemple, Brun-Lafleur *et al.*, (2010) a cherché à évaluer l'impact des interactions entre l'apport d'énergie et de protéines de la ration sur la production laitière et la composition du lait dans le cas où les vaches en lactation ne sont pas nourries selon leurs besoins.

L'implémentation de modèles permet de développer des outils opérationnels, diffusables et utilisables en recherche et en développement (Sørensen *et al.*, 1992) ou encore en enseignement (Moulin *et al.*, 2004). De tels outils permettent de tester des hypothèses scientifiques et d'étudier le comportement du modèle associé (Coquillard et Hill, 1997). La recherche ne peut en effet mobiliser tous les efforts financiers et structurels qu'il conviendrait pour aboutir aux mêmes recherches (Peck, 2004, Hirooka, 2010). De même, dans le cas d'exploitations agricoles commerciales, mettre en place de nouvelles pratiques innovantes, recombinaison le système de production est bien souvent trop risqué pour la pérennité financière et technique de l'entreprise (Le Gal *et al.*, 2011). En effet, selon Ezzano (2002), l'utilisation d'un modèle implémenté permet d'explorer virtuellement des situations extrêmes ou de ruptures, impossibles à réaliser dans le réel (fermes d'expérimentation ou commerciales). L'approche par modélisation permet également de contrôler parfaitement l'environnement agissant sur le système (données d'entrée) et d'interpréter ainsi plus facilement l'action d'une variable exogène sur l'ensemble du système (Hirooka, 2010).

Selon les arguments développés ci-dessus, l'utilisation de l'approche systémique semble appropriée pour étudier la durabilité des systèmes ciblés selon des objectifs parfois divergents, à différentes échelles (Bernuès *et al.*, 2011). Dans le cadre de cette thèse, ces objectifs contradictoires s'expriment à travers les compromis qu'il est possible d'atteindre au sein du système de production d'une exploitation laitière en zone contraignante afin d'aboutir à une plus grande autonomie alimentaire et fourragère. De même, la création d'un outil implémenté à partir d'un modèle conceptuel permet d'explorer une grande diversité de scénarios et d'analyser leurs impacts sur le système de production dans sa globalité.

2.4 Les modèles de systèmes de production animale (ou de systèmes d'élevage)

2.4.1 Les principaux types de modèles et leurs objectifs

L'utilisation des modèles rejoint deux finalités principales (Peck, 2004). D'une part, les modèles descriptifs renseignent sur la nature des relations entre les composants du système et prédisent ses relations. D'autre part, les modèles explicatifs offrent un éclaircissement sur les processus et le comportement du système (Cros *et al.*, 2003).

Nous identifions et présentons ici plusieurs types de modèles ayant pour objet d'étude les systèmes agricoles (Coquillard et Hill, 1997, Rossing *et al.*, 1997, Keating et McCown, 2001, Hirooka, 2010, Gouttenoire *et al.*, 2011) :

a. Les modèles d'optimisation

Ces modèles sont des outils d'aide à la décision. Ils sont statiques, donc indépendants de l'évolution du système au cours du temps, et déterministes (Keating et McCown, 2001). Avec un même jeu de données d'entrée du modèle, les sorties sont toujours identiques. La vocation de ce type de modèle est de déterminer l'ensemble des actions qui permettent d'aboutir au système de production optimal selon un objectif principal, appelé « fonction objectif » (Veysset *et al.*, 2000, Hirooka, 2010). La résolution du problème pour aboutir à l'optimum ne peut se faire qu'en prenant en compte l'ensemble des processus du système et des contraintes inhérentes au système. Cette résolution mathématique s'effectue par la technique de programmation linéaire (Hirooka, 2010). Les modèles d'optimisation peuvent être utilisés dans le domaine des systèmes d'élevage à différentes échelles comme le montre ces quelques exemples :

- échelle de l'animal : pour la formulation de la ration des animaux de façon à maximiser la production en fonction des besoins identifiés ou de façon à minimiser le coût de la ration comme l'outil CNCPS, Cornell Net Carbohydrate and Protein System (Tedeschi *et al.*, 2000, Tedeschi *et al.*, 2005) ou le module de rationnement de Perf'Agro (Tristant *et al.*, 2004)
- échelle du parcellaire comme Fumigène (Chardon, 2008) pour calculer l'épandage optimal des déjections animales selon les besoins, la réglementation ou rationaliser l'assolement et l'utilisation des terres (Makowski *et al.*, 2000)
- échelle du système de production animale avec des modèles ayant pour objectif de maximiser la marge brute de l'exploitation ou minimiser les consommations d'énergie ou d'émissions de gaz à effet de serre comme Perf'Agro (Tristant *et al.*, 2006, Jacquot, 2008) ou Opt'Inra (Veysset *et al.*, 2000). Ce type de modèle a également été utilisé par étudier l'impact de politiques publiques (réforme de la PAC, mesures pour conserver la biodiversité) ou d'évolution du contexte socio-économique (fluctuation des prix des intrants ou des céréales). Par exemple, Garcia-Martinez *et al.* (2011) ont

développé un modèle de programmation linéaire afin d'étudier l'impact des réformes de la PAC et du contexte socio-économique sur les trajectoires des exploitations bovines situées en zones montagneuses. Ou encore, Osgathorpe *et al.* (2011) ont étudié l'impact économique de mesures environnementales visant à protéger le bourdon dans les systèmes agricoles mixtes extensifs des îles Hébrides et du Nord de l'Ecosse.

b. Les modèles de simulation dynamique des processus de production

Les modèles de simulation peuvent être définis comme étant un ensemble de règles (équations, flux, compartiments...) qui décrivent mathématiquement la réponse de chaque compartiment et leurs interconnexions en une ou un ensemble de variables (Tedeschi *et al.*, 2005). Ces règles mathématiques déterminent comment le système modélisé évolue dans le temps en fonction de son état présent (Borshchev et Filippov, 2004).

Au sein de ce type de modèle, nous pouvons opposer les modèles stochastiques aux modèles déterministes (Sauvant, 1992, Sørensen *et al.*, 1992, Coquillard et Hill, 1997, Tedeschi *et al.*, 2005, Hirooka, 2010). Les modèles stochastiques introduisent la notion d'aléatoire dans les processus décrits dans le modèle (Hirooka, 2010). Les sorties du modèle diffèrent donc pour un même jeu de données d'entrée. A l'opposé, les modèles déterministes relient les données de sortie à celles d'entrée selon des mécanismes identifiés et connus des éléments du système et de leurs interrelations (Gibon *et al.*, 1999b). Les modèles déterministes reposent sur des théories expliquant comment le système et ses composants fonctionnent (Peck, 2004). A l'échelle du système de production animale, ces modèles permettent donc de représenter explicitement les pratiques des éleveurs, ou itinéraires techniques, et les processus biophysiques des composants du système. Pour donner un aperçu non exhaustif des modèles existants dans le domaine des élevages laitiers, Vayssières *et al.*, (2009) ont développé un simulateur à l'échelle de l'exploitation, Gamède, afin d'étudier l'influence des pratiques des agriculteurs sur la durabilité des systèmes bovins laitiers en se focalisant sur les flux de biomasse et d'azote ainsi que sur les composantes productives comme le lait, les rendements fourragers et des cultures, le travail de l'agriculteur. De même, Chardon (2008) et Rigolot (2009) ont conjointement modélisé par simulation l'exploitation laitière et l'élevage porcin afin d'évaluer l'impact de leur fonctionnement et des flux de matières associées sur l'environnement selon les pratiques des agriculteurs (projet Melodie). Cette orientation a également été suivie par Schils *et al.*, (2007) ou Del Prado *et al.*, (2011) dans les modèles respectifs DairyWise et SIMS_{DAIRY} qui simulent les processus techniques (les besoins du troupeau, la production et la consommation des fourrages et céréales), environnementaux (émissions de gaz à effet de serre, consommation d'énergie, cycle de l'azote et du phosphore...) et économiques (marge brute, dépenses et ventes) d'une exploitation laitière. Le simulateur Sebien (Jouven, 2006) modélise les interactions entre les troupeau allaitant, les ressources en prairies et la conduite de l'éleveur dans le but de comprendre quelles sont les pratiques permettant des bonnes performances animales tout en préservant la diversité floristiques des prairies permanentes.

Les modèles de simulation dynamique et déterministes permettent également d'être : i) un appui à la décision en vue d'aider les conseillers par exemple comme le fait le modèle Sepatou développé par (Cros *et al.*, 2000) définissant et évaluant des stratégies de pâturage ; ii) un cadre pour concevoir des systèmes innovants comme le fait le modèle Sediver (Martin *et al.*, 2011) pour composer des systèmes fourrages capables de valoriser la diversité biologique végétale et animale afin de garantir voir d'accroître leurs performances productives face à des changements (aléas climatiques).

A contrario, les modèles stochastiques considèrent le système, ou un processus comme une « boîte-noire ». Ces derniers permettent également d'étudier le fonctionnement entre deux échelles spatiales, par exemple entre l'animal et le troupeau. Ainsi pour Sørensen *et al.* (1992), les modèles de simulation stochastiques permettent d'étudier comment les effets à l'échelle de l'individu influencent la production et les performances du troupeau. Le modèle (SimHerd) développé par Sørensen *et al.* (1992) a été implémenté pour tester différentes stratégies alimentaires et de reproduction (réformes et vêlages) sur les performances individuelles et celles du troupeau. Ce modèle a également été utilisé et modifié par Kristensen *et al.* (1997) pour expérimenter l'effet du chargement de pâturage sur les performances individuelles et celles du troupeau laitier. Selon la même philosophie, Villalba *et al.* (2006) utilisent un modèle stochastique pour rendre compte des différences entre les réponses individuelles et les réponses à l'échelle du troupeau et, ainsi, s'affranchir des relations complexes de la réponse animale face aux stratégies alimentaires. Villalba *et al.* (2006) ont ainsi étudié l'effet de différentes stratégies alimentaires sur les trajectoires productives d'exploitations bovins allaitants en montagne. Ces stratégies alimentaires se traduisent par différentes rations hivernales offrant un degré variable de couverture des besoins induisant différentes performances productives et reproductives du troupeau.

Les modèles stochastiques sont également utilisés pour introduire la notion de risque dans les systèmes de production agricole et leur management. Ainsi, Flaten et Lien (2009) ont étudié l'impact économique et technique sur les élevages herbivores sous label agriculture biologique de l'interdiction d'incorporer à la ration des produits non issus de l'agriculture biologique, en introduisant des risques tels que la volatilité des prix, les changements politiques ou encore les risques biologiques. Mosnier (2009) a développé un sous-modèle d'exploitation récursif en programmation stochastique discrète couplé à un sous-modèle économétrique estimant une fonction de production en présence de deux sources de risque. Ce modèle, Dyball, couplant les deux sous-modèles a été créé dans le but d'évaluer l'impact des aléas de prix et de climat sur la conduite du troupeau allaitant et des cultures par les éleveurs.

c. Les modèles axés sur les processus décisionnels

D'autres types de modèles existent pour analyser les systèmes de production animale comme les ceux basés sur la modélisation des processus décisionnels des agriculteurs. Ils sont regroupés sous trois catégories (Keating et McCown, 2001) :

- les modèles de décisions (Girard et Hubert, 1999, Cros *et al.*, 2003, Andrieu *et al.*, 2008) modélisant le comportement des éleveurs en tant que décideurs. Ces modèles représentent les règles de décisions et de formation des processus décisionnels des agriculteurs.
- Les modèles « système-expert » se basant sur les théories d'intelligence artificielle. Ils permettent de simuler le savoir-faire du décideur et de modéliser son raisonnement en intégrant les connaissances d'experts (de Ruffray, 2004). Cependant ces modèles sont peu usités dans le domaine des systèmes de production agricole car ils n'intègrent pas les processus biophysiques du système de production et manquent d'ancrage par rapport à la réalité pour leur validation (Keating et McCown, 2001).
- Les modèles de simulation en tant que support de discussion sur le management et les processus décisionnels en recherche – action. Ces modèles utilisent les méthodes participatives pour reformuler et redessiner les systèmes de production selon de nouvelles finalités afin d'aboutir à des pratiques innovantes (Gouttenoire *et al.*, 2011). Ces modèles permettent de quantifier et évaluer l'impact de pratiques innovantes sur leur système de production (Le Gal *et al.*, 2009, Le Gal *et al.*, 2011).

Ces modèles ne sont pas des outils envisageables dans le cadre de cette thèse, malgré leur pertinence pour aborder l'adaptation des systèmes de production face à des aléas à travers leurs capacités à réorganiser leur structure interne vers une nouvelle finalité et leurs capacités d'apprentissage. Nous avons en effet choisi de nous intéresser uniquement aux modèles traduisant un système capable de maintenir sa finalité en cas de perturbation (système rigide ou élastique). De plus, les modèles de simulation dynamique nous permettent de décrire finement les processus et fonctionnements biophysiques de l'exploitation laitière herbagère.

Par conséquent, les modèles de simulation dynamique semblent être les plus adéquats pour répondre à la problématique en adoptant une approche par modélisation. En effet, ils prennent en compte l'évolution du système et de ses composants au cours du temps, ils sont flexibles et peuvent inclure un grand nombre d'éléments dans l'analyse du comportement du système contrairement aux modèles d'optimisation (Hirooka, 2010, Garcia-Martinez *et al.*, 2011, Osgathorpe *et al.*, 2011). Cette possibilité d'analyse « multi-objectifs » est particulièrement importante pour étudier les compromis entre les différents composants des systèmes de production des exploitations laitières bovines en zones contraignantes. En outre, un modèle de simulation dynamique déterministe permet de représenter explicitement les processus au sein du système, aussi bien les actions des facteurs extérieurs, les processus biophysiques que le management de l'éleveur à travers les objectifs de production et le pilotage des sous-systèmes biophysiques.

2.4.2 Représentation des troupeaux laitiers dans les différents modèles existants

Modéliser le fonctionnement d'une exploitation laitière ne peut se faire sans représenter l'ensemble du troupeau, connaître les effectifs de chaque catégorie d'animaux à chaque pas de temps de la simulation.

Plusieurs modèles existant dans la littérature représentent de façons différentes le fonctionnement du troupeau avec des objectifs bien définis. Ainsi, par exemple dans le modèle SITEL développé par Brun-Lafleur (2011), le troupeau peut être vu en tant que collection d'individus, où un individu est considéré comme une entité unique dont la carrière est parcourue d'événements, commençant avec la naissance et s'achevant avec la disparition de l'individu. Cette approche a été également développée dans le modèle SimHerd (Sørensen *et al.*, 1992, Kristensen *et al.*, 1997) où les données individuelles des vaches laitières sont agrégées pour former un troupeau. Ce modèle prend en compte la structure du troupeau (taille et quota laitier) et la gestion du troupeau à travers les régimes alimentaires et évalue leurs impacts sur le troupeau, notamment sur les stratégies de réforme et de renouvellement du troupeau (Sørensen *et al.*, 1992). L'approche « individu-centré » a également été choisie dans le modèle DairyWise développé par Schils *et al.*, (2007). Concevoir le troupeau laitier comme une collection d'individus permet de représenter finement les individus, leur carrière et les événements auxquels ils sont soumis (croissance, mise à la reproduction, lactation...). Cela permet aussi pour le modèle SITEL ou SimHerd, de simuler la variabilité individuelle et les performances individuelles et du lot (Puillet *et al.*, 2010) ou encore les processus biologiques comme l'ingestion, la production laitière ou les émissions de gaz, comme dans le modèle DairyWise.

D'autres modèles représentent le troupeau en le subdivisant en catégories ou classes d'animaux. GEDEMO, développé par Coquil *et al.*, (2005), comporte 21 classes d'animaux et Beef Herd model ou DAFOSYM, tous deux mis au point par Rotz *et al.*, (1999, 2005), reposent sur 6 groupes d'animaux. GEDEMO a pour objectif de simuler les variations interannuelles des effectifs d'un troupeau laitier et ses flux associés (flux d'ingestion et de production) (Coquil *et al.*, 2005). Rotz *et al.*, (2005) ont intégré le troupeau laitier au sein d'un plus grand modèle, DAFOSYM, afin de prédire les consommations d'aliments : les différents fourrages produits sur l'exploitation ou achetés et les aliments concentrés. DAFOSYM permet de prédire également les productions animales et les rejets organiques. GEDEMO est un modèle à compartiments (les classes d'animaux), régis par les flux démographiques définis selon la description de la carrière de la vache laitière et les taux de mortalité ou réforme choisis. Ce modèle permet de prendre en compte les périodes de vèlages au cours de la campagne et les achats d'animaux, l'âge moyen au premier vèlage et le taux de réforme. C'est un modèle déterministe, non affecté par des aléas extérieurs au troupeau (Chardon, 2008). Le paramétrage du modèle GEDEMO doit être cohérent afin d'éviter la dérive des effectifs du troupeau (disparition ou agrandissement trop important du troupeau) (Chardon,

2008). Le modèle développé par Rotz *et al.*,(1999) est figé, une fois paramétré. Les effectifs de chaque groupe sont déterminés selon une répartition correspondant au cycle de lactation standard : 16% de vaches en début de lactation, 23% en milieu de lactation, 46% en fin de lactation et 15% de vaches tarées. La répartition des primipares et multipares ainsi que les effectifs des groupes de génisses sont déterminés selon le taux de renouvellement. Les groupes sont caractérisés par les spécificités des races (poids vif, variation de poids vif, capacité d'ingestion) et des paramètres de production (production laitière potentielle, composition en matières grasses du lait). Ni la période de vêlages ni la répartition des vêlages ne sont pris en compte. Ce modèle de troupeau ne sert qu'à calculer les flux d'ingestion et de production théoriques en étant connecté à un modèle de rationnement utilisant la programmation linéaire (modèle non dynamique recherchant la meilleure solution selon un objectif à un moment donné).

Plusieurs manières de représenter le troupeau et sa démographie sont donc possibles. Certains utilisent des modèles « individu-centré » et agrègent les individus pour en faire des lots (Sørensen *et al.*, 1992, Schils *et al.*, 2007, Beukes *et al.*, 2008, Brun-Lafleur, 2011). D'autres utilisent des modèles à compartiments reliés entre eux par des flux démographiques (Coquil *et al.*, 2005, Vayssières *et al.*, 2009) ou des modèles matriciels démographiques, appelés notamment matrice de Leslie, où les animaux se déplacent de classes d'âge en classe d'âge selon leur proportion par classe et des probabilités de transition (Ezanno, 2002). Nous avons choisi de concevoir notre modèle de démographie d'une autre manière afin que le modèle développé corresponde à nos objectifs, aux questions de recherche définies et au fonctionnement du modèle global.

CHAPITRE III

3 DEMARCHE SCIENTIFIQUE

3.1 Développement des questions de recherche

Aux vues des éléments contextuels résumés dans la Figure 1 et de l'étude des travaux portant sur la durabilité des systèmes herbagers, tendre vers un plus grand degré d'autonomie alimentaire et fourragère à l'échelle de l'exploitation est l'une des voies pour améliorer la durabilité des systèmes de production. Il est donc important de comprendre quels sont les niveaux de production qu'il est possible d'atteindre, en conciliant les contraintes de production et l'utilisation durable des prairies et des ressources pour les systèmes de production laitiers herbagers selon leurs caractéristiques. Nous posons l'hypothèse qu'une meilleure adéquation entre la dynamique des besoins alimentaires, déterminés par les objectifs de production de l'éleveur et la dynamique de l'offre fourragère, en herbe pâturée et en fourrages conservés, permet d'atteindre des compromis entre productions animales, utilisation durable des ressources et recherche d'autonomie fourragère et alimentaire. Ce meilleur ajustement permet également aux systèmes herbagers d'améliorer leurs capacités à s'adapter face à des changements, que ce soient des contraintes de production ou des aléas climatiques.

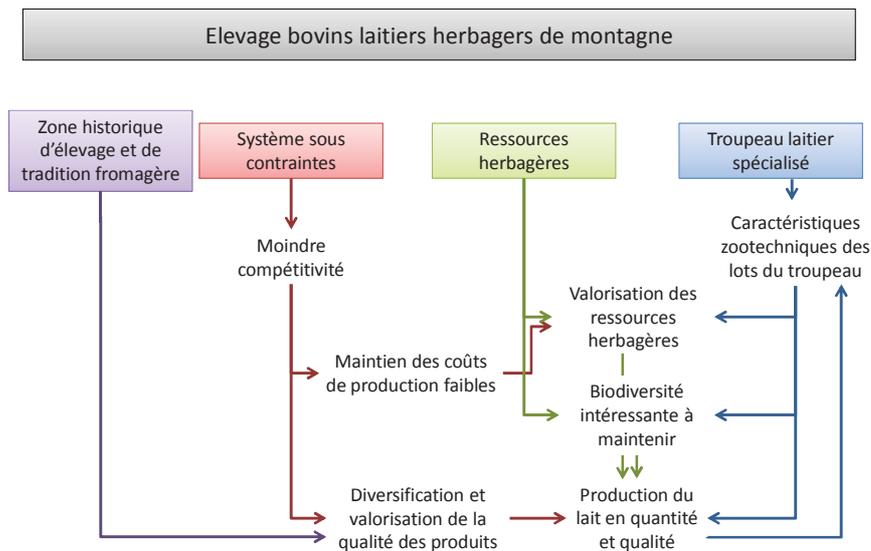


Figure 1: Eléments contextuels et élaboration de la problématique

Afin d'étudier les compromis qu'il est possible d'atteindre au sein du système de production et de tester notre hypothèse, le travail de thèse se décline en deux questions de recherche principales :

1. **Quels sont les compromis qu'il est possible d'atteindre dans un système sous contraintes, entre performances animales, utilisation durable des ressources alimentaires et offertes par les prairies, et recherche d'une plus grande autonomie ?**

L'objectif est d'explorer plusieurs systèmes de production contrastés ayant différents objectifs de production et d'étudier leur comportement en termes de production laitière, état corporel des animaux du troupeau, bilan fourrager, utilisation des ressources offertes par les prairies...

Les objectifs de production sur lesquels diffèrent les systèmes de production à explorer sont d'une part, la distribution des vêlages au cours de l'année, déterminant la dynamique de production animale et des besoins alimentaires et, d'autre part la gestion du système fourrager.

Outre cette exploration de systèmes de production contrastés, une question essentielle sous-jacente est l'identification de compromis. Comment développer une évaluation des compromis entre les performances animales, l'utilisation durable des ressources, l'autonomie fourragère et alimentaire ? Comment identifier et construire des indicateurs sur l'état des différentes composantes du système de production ? Comment rendre compte de l'évolution des différentes composantes du système au fil du temps ?

2. Quelles sont les capacités des systèmes de production explorés à faire face à des changements de contraintes de production ou des aléas climatiques ?

Parmi les systèmes explorés en lien avec notre première question de recherche, nous voulons évaluer leur aptitude à maintenir ces compromis en faisant face à des changements. Les changements peuvent être un renforcement des contraintes de production, comme une diminution des apports d'aliments concentrés, ou des aléas climatiques avec des années pluvieuses au moment des récoltes ou des années de sécheresse. L'objectif est alors d'identifier les systèmes les plus aptes à maintenir leurs compromis.

L'importance des contraintes structurelles agissant sur les stratégies décidées par l'éleveur, appliquées au troupeau et/ou au système fourrager, sont également un point important à étudier. Ainsi, les contraintes géographiques impliquant une gestion du système fourrager spécifique (part des surfaces pâturables et des surfaces fauchables dans le parcellaire par exemple) jouent-elles un rôle limitant dans l'équilibre d'un système de production et son maintien face à des aléas climatiques ? De même, les caractéristiques zootechniques des animaux déterminant les performances possibles du troupeau, comme le potentiel laitier, représentent-elles un levier ou une limite au maintien des compromis au sein du système de production ?

3.2 Démarche méthodologique

L'approche systémique permet de prendre en compte les différents éléments du système de production et leurs interactions. L'élaboration d'un modèle, à l'échelle de l'exploitation, permet de matérialiser ces éléments : les prairies, le troupeau et la gestion de l'éleveur agissant sur ces éléments. L'utilisation du modèle permet également d'observer et de comprendre l'évolution de l'état des composantes du système ainsi que d'évaluer l'impact d'un changement sur l'ensemble du système. C'est pourquoi, afin de répondre aux questions de recherche, nous avons choisi de développer un modèle de simulation dynamique.

L'objectif principal de la création du modèle est de tester l'hypothèse qu'une meilleure adéquation entre dynamique de production laitière et dynamique d'offre fourragère et alimentaire permet d'améliorer le degré d'autonomie de l'exploitation sans compromettre les productions animales et l'utilisation des ressources offertes par les prairies. La construction du modèle doit donc être orientée autour des questions d'autonomie et de la dynamique des productions animales et végétales. Deux manières de penser l'orientation, et donc la sortie principale du modèle s'imposent à nous. Ces deux orientations possibles reviennent à s'interroger sur le choix de stratégie d'alimentation des vaches laitières. Tout d'abord, nous pouvons créer un ou plusieurs **indicateurs relatant le degré d'autonomie fourragère atteint et la consommation d'aliments** en provenance de l'extérieur de l'exploitation. *A contrario*, la sortie principale peut s'envisager comme **la production laitière permise par l'offre fourragère produite sur l'exploitation et l'offre alimentaire autorisée**.

Dans le premier cas, les vaches laitières sont alimentées de façon à couvrir leurs besoins, déterminés par leur stade physiologique (croissance, entretien et gestation) et par leur potentiel laitier. Si l'offre fourragère est insuffisante, une complémentation en fourrages et en aliments concentrés en provenance de l'extérieur de l'exploitation est assurée. Dans ce cas-là, la sortie principale peut prendre la forme d'un indicateur d'autonomie fourragère et alimentaire avec, par exemple, la part du lait produit par les fourrages émanant de l'exploitation ou encore le total des fourrages et aliments consommés achetés. Dans cette disposition et dans le cadre d'une démarche de qualité, l'indicateur d'autonomie indique, *a posteriori*, si le système de production est en adéquation avec un cahier des charges.

Dans le deuxième cas, les vaches sont alimentées selon l'offre fourragère et herbagère disponible et les aliments concentrés autorisés. Cette offre alimentaire ne permet alors pas forcément de couvrir les besoins des animaux en toutes circonstances. Par conséquent, les vaches en lactation produisent d'une part, selon leur potentiel laitier et, d'autre part, selon les apports de la ration qui leur est offerte. La sortie principale de cette orientation du modèle est alors la production laitière permise par l'offre alimentaire. Cette orientation permet de prendre en compte, *a priori*, les contraintes imposées par les cahiers des charges.

Nous avons donc choisi d'orienter la construction du modèle selon cette dernière disposition puisqu'elle nous permet d'inclure directement les contraintes des cahiers des charges à travers notamment la quantité d'aliments concentrés autorisés. En effet, la philosophie sous-jacente à la mise en place d'un cahier des charges est de valoriser la production par la qualité et non de maximiser la quantité produite. En outre, cette solution nous permet de tenir compte de la fluctuation des apports alimentaires au pâturage et de mesurer les conséquences de cette fluctuation sur la production. En effet, mettre le pâturage au cœur du système d'alimentation, c'est accepter une variabilité de la qualité et de la quantité de l'alimentation de base qui n'autorise pas forcément la maximisation de la production laitière (Moulin *et al.*, 2001). Cette orientation permet également d'évaluer les conséquences de la gestion du pâturage par l'éleveur sur la production laitière.

Toutefois, pour évaluer le compromis entre productions animales, utilisation durable des prairies et autonomie fourragère, il convient de connaître des informations sur l'évolution de l'état du couvert herbacé, sur les taux d'utilisation de la biomasse des prairies lors du pâturage et des fauches, sur les rendements des fauches et la qualité des fourrages récoltés et sur les bilans fourragers. De même, si les animaux ne sont pas toujours nourris selon leurs besoins, du fait de la variabilité de l'offre fourragère en qualité et en quantité. Par conséquent, il est adéquat de recueillir des informations sur la dynamique de l'ingestion réelle des animaux, en quantité et en qualité, sur l'état corporel, dépendant du bilan énergétique entre l'énergie ingérée et les besoins et donc, sur la variation du poids vifs des animaux. En outre, le modèle créé doit permettre d'évaluer l'impact des pratiques de l'éleveur sur les deux sous-systèmes biotechniques, notamment à travers le bilan fourrager, le calendrier fourrager et le calendrier de pâturage.

3.3 Démarche de thèse et plan de thèse

Pour répondre aux questions de recherche développées ci-dessus et construire notre simulateur Dynamilk, une démarche de modélisation classique a été adoptée (Tedeschi, 2006). Le plan de la thèse suit et décrit chacune de ces étapes (Figure 2).

La première partie du manuscrit a permis d'inscrire le sujet dans un contexte socio-économique et scientifique pour aboutir à la définition de la problématique et des questions de recherche ainsi que la démarche méthodologique à suivre. Cette étape a aussi permis de préparer et définir le cahier des charges du simulateur Dynamilk présenté dans le chapitre 4.

Dans le chapitre 4, les objectifs de simulation, les frontières du système étudié et du modèle sont présentés (Borshchev et Filippov, 2004). Au cours de cette partie, nous définissons la structure du modèle conceptuel global, son orientation et les principaux choix de modélisation. Ce chapitre présente également un exemple de l'utilité de l'approche par modélisation orientée objet à travers la présentation du sous-modèle « parcellaire ». Le modèle est ensuite décomposé et présenté par sous-modèles : « troupeau » (chapitre 5) et « conduite et pilotage des systèmes biotechniques » (chapitre 6). Ces deux chapitres décrivent la philosophie et le fonctionnement de chaque sous-modèle ainsi que leur mise en équation. Une des étapes essentielles du processus de modélisation est la validation ou l'évaluation du modèle créé (Peck, 2004, Tedeschi, 2006). Cette étape permet de vérifier le comportement du modèle tel qu'il est défini dans les objectifs de modélisation et le cahier des charges, ainsi que sa sensibilité face aux questions que nous voulons étudier. La validation permet également d'indiquer le niveau de précision et de vraisemblance du simulateur (Tedeschi, 2006) par rapport au système modélisé. En d'autres termes, cette étape permet d'inscrire le simulateur et son utilisation dans un domaine de validité permettant de renforcer la pertinence et le poids des résultats et de leur interprétation (Coquillard et Hill, 1997). Il existe plusieurs méthodes de vérification et validation d'un modèle, méthodes référencées notamment dans l'ouvrage « Modélisation et simulation d'écosystème » de Coquillard et Hill (1997) ou l'article de Tedeschi (2006). Parmi les méthodes proposées, nous avons choisi d'utiliser la comparaison de la réponse du modèle avec des données empiriques (expérimentales ou bibliographiques). L'étude du comportement du modèle a été effectuée en faisant varier certains paramètres importants du système, paramètres pouvant se révéler également être des leviers dans la recherche d'un compromis entre productions animales, utilisation des ressources et recherche d'autonomie alimentaire à l'échelle de l'exploitation. Ces éléments de validation ne permettent cependant pas d'attester totalement du fonctionnement du modèle. Ils ressortent plus d'éléments de discussion pour une validation ultérieure par des experts. En effet, puisqu'un modèle est une abstraction et une représentation simplifiée de la réalité, le modèle ne peut jamais simuler la réalité en toutes conditions (Coquillard et Hill, 1997, Peck, 2004, 2006).

Les chapitres 5 et 6 présentent donc aussi ces éléments de validation, plus particulièrement dans le module présentant le lot des vaches laitières (sous-modèle

troupeau). Cette partie a nécessité un important effort de modélisation tout comme celle consacrée à la mise en place de la conduite et du pilotage des systèmes biotechniques.

Une fois le simulateur Dynamilk construit et considéré comme validé, vient ensuite la phase d'exploitation du simulateur Dynamilk. Le chapitre 7 est consacré à la mise au point de scénarios d'étude décrivant des systèmes de production contrastés afin d'explorer les compromis qu'il est possible d'atteindre entre productions animales, utilisation des ressources et recherche d'un plus grand degré d'autonomie. Ensuite, vient l'étape de traitement des données et du choix des indicateurs. En effet, le simulateur nous permet de connaître tout au long du processus l'état journalier de chaque objet et de ses attributs. Le simulateur génère ainsi un grand nombre de données brutes. Il était donc essentiel de valoriser ces résultats par le biais d'indicateurs et de sorties synthétiques pertinents, construits en relation avec les objectifs de recherche. Cette partie permet de répondre à la première question de recherche. Le chapitre 8 permet de répondre à la deuxième question de recherche, à savoir : quels systèmes sont plus résilients face à des changements ou des aléas, une fois les scénarios contrastés établis. Les systèmes de production étudiés sont ainsi comparés sur l'ensemble des indicateurs et des sorties synthétiques.

La dernière partie est enfin consacrée à la discussion générale présentant un bilan du travail de thèse effectué par rapport aux objectifs définis dans la première partie. La construction et les hypothèses fondatrices du modèle sont discutées, tout comme la pertinence des résultats du simulateur. En conclusion de cette partie, des perspectives d'évolution et d'utilisation du modèle sont proposées.

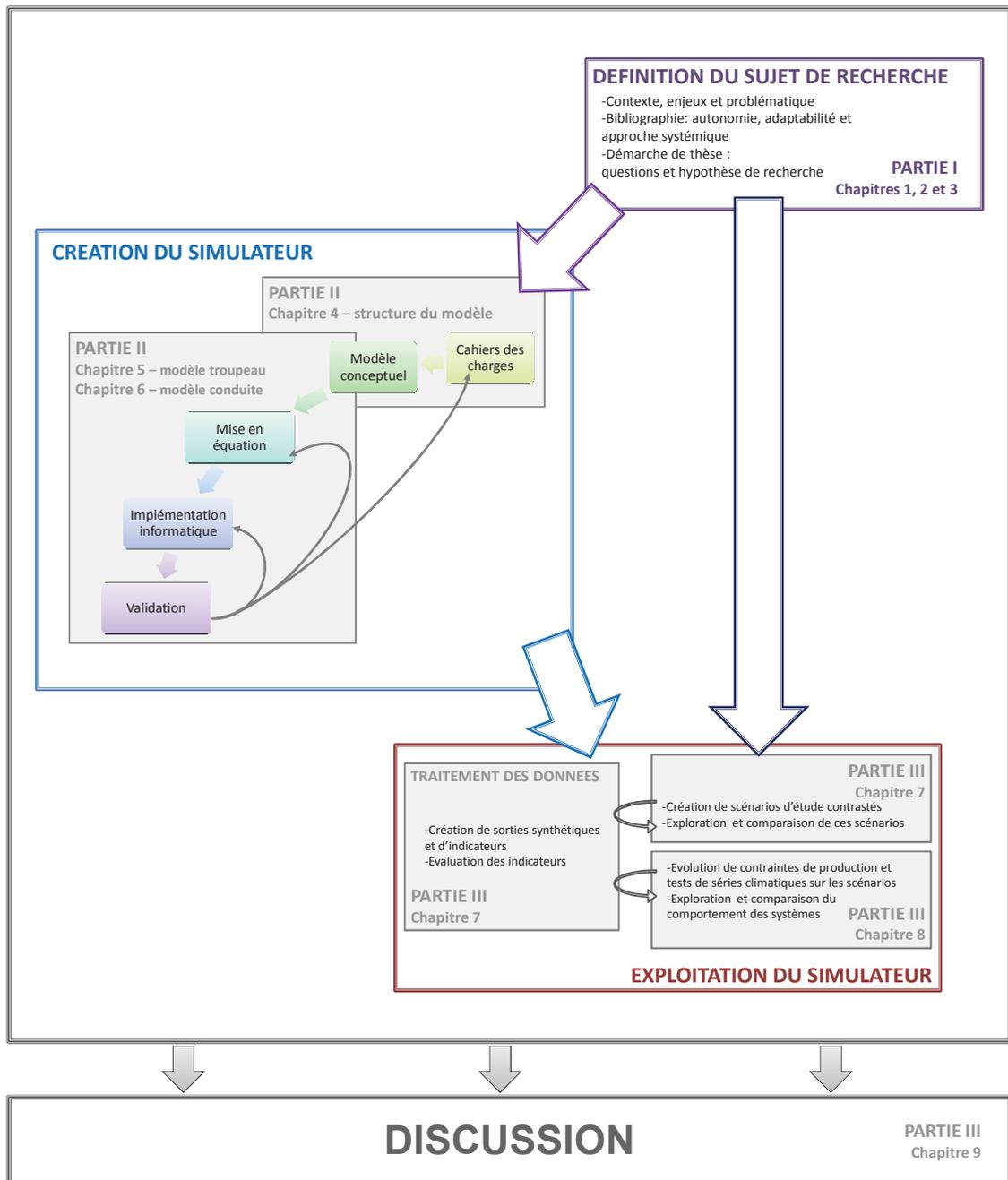


Figure 2: Démarche de travail et plan de thèse

CHAPITRE IV

4 CAHIER DES CHARGES ET STRUCTURE DU MODELE

4.1 Conception du modèle

4.1.1 Quelles informations spécifiques des systèmes d'élevage laitiers herbagers situés en montagnes doivent être prises en compte dans le modèle ?

La création d'un modèle à l'échelle de l'exploitation permet de tester et évaluer une grande diversité de systèmes de production afin de comprendre quelles sont les marges de manœuvre possibles pour améliorer l'autonomie ou de comprendre quels sont les éléments limitant cette amélioration pour des systèmes herbagers sous contraintes. Outre la répartition des besoins alimentaires au cours de l'année, déterminée par la **distribution des vêlages**, il est pertinent de tester plusieurs dispositions des éléments du système. Les grandes thématiques ou entrées du simulateur sur lesquelles nous pouvons jouer afin d'expérimenter diverses situations de production sont :

- ◆ **La structure du troupeau** à travers la taille du troupeau, sa composition en lien avec la distribution des vêlages, l'âge au premier vêlage
- ◆ **Les performances zootechniques** avec le niveau de production laitière des vaches laitières, les stratégies de réforme et de renouvellement, la conformation des animaux
- ◆ **Les caractéristiques du parcellaire et la gestion du système fourrager** à travers la taille du parcellaire, sa configuration spatiale, le morcellement, le rapport entre les surfaces de fauche et de pâturage
- ◆ **Les contraintes de production spécifiques**

Ces deux derniers points sont plus amplement détaillés ci-dessous afin d'appréhender quelles sont les contraintes spécifiques (de production ou physiques) à prendre en compte.

Les données climatiques sont également une source utilisée en tant qu'entrée du modèle. Pour évaluer les capacités adaptatives des systèmes de production herbagers, nous étudions le comportement des systèmes de production et l'évolution des états des différents éléments de ce système en utilisant des séries climatiques longues, supérieures à une durée de 20 ans. Ces séries climatiques, réelles, comportent des années remarquables avec notamment des périodes caniculaires estivales (1994, 2003, 2006), de déficit pluviométrique au printemps ou en été (2004, 2005) ou d'excédent pluviométrique pendant la saison de fenaison (2007, 2008) (Météofrance).

4.1.1.1 *Contraintes de production*

Adhérer à une démarche de qualité de type AOP permet aux exploitations situées en montagne de valoriser la qualité du lait produit et de se démarquer du marché national. Il est donc fondamental de pouvoir inclure dans le modèle quelques contraintes imposées par certains cahiers des charges AOP. Pour cela, une analyse comparative de plusieurs cahiers des charges a été réalisée afin d'identifier les types de contraintes les plus fréquentes. En effet, nous souhaitons aussi que le modèle soit suffisamment générique pour qu'il puisse être adaptable à plusieurs situations : des systèmes herbagers n'étant pas affiliés à une démarche de qualité quelconque aux systèmes sous cahier des charges avec des niveaux de contraintes plus ou moins importants.

Pour réaliser cette analyse, nous avons comparé les cahiers des charges de plusieurs AOP se situant sur différents massifs : le beaufort, le cantal, le reblochon, le saint-nectaire, le comté et le laguiole. Plus précisément, nous avons étudiés les directives des cahiers des charges attenantes aux caractéristiques reliées aux facteurs naturels, aux pratiques culturelles et à la conduite d'élevage. Nous avons exclu de cette analyse les pratiques technologiques liées à la collecte et à la transformation du lait. Cette analyse comparative est présentée plus en détails dans les annexes de cette thèse, seule la formation du cahier des charges générique est présentée ici.

Les déterminants-clés récurrents des cahiers des charges présentés dans la Figure 1 montrent l'objectif principal du cahier des charges qui est de relier la production à son terroir d'origine. Ceci se traduit par :

- ◆ **la définition de l'aire géographique de production** que ce soit du lait, mais aussi des aliments utilisés par le troupeau (fourrages, limitations des aliments concentrés et/ou importés en dehors de la zone géographique) ou du troupeau lui-même (race emblématique d'une région, animaux nés et élevés sur la zone géographique).
- ◆ **une certaine limitation de la production** qui s'exprime directement via un plafond de production laitière par animal ou par hectare ou indirectement via un chargement au pâturage plafonné, une limitation des apports d'aliments concentrés ou l'imposition d'une race locale ayant une productivité plus faible comme par exemple les vaches de race simmental, tarine, salers ou aubrac.
- ◆ **les pratiques de l'éleveur appliquées au système d'élevage** à travers l'obligation d'une période minimale de pâturage, les types de fauches et de fourrages conservés autorisés (les fourrages fermentés étant exclus de la plupart des cahiers des charges), des règles sur la composition de la ration des animaux.

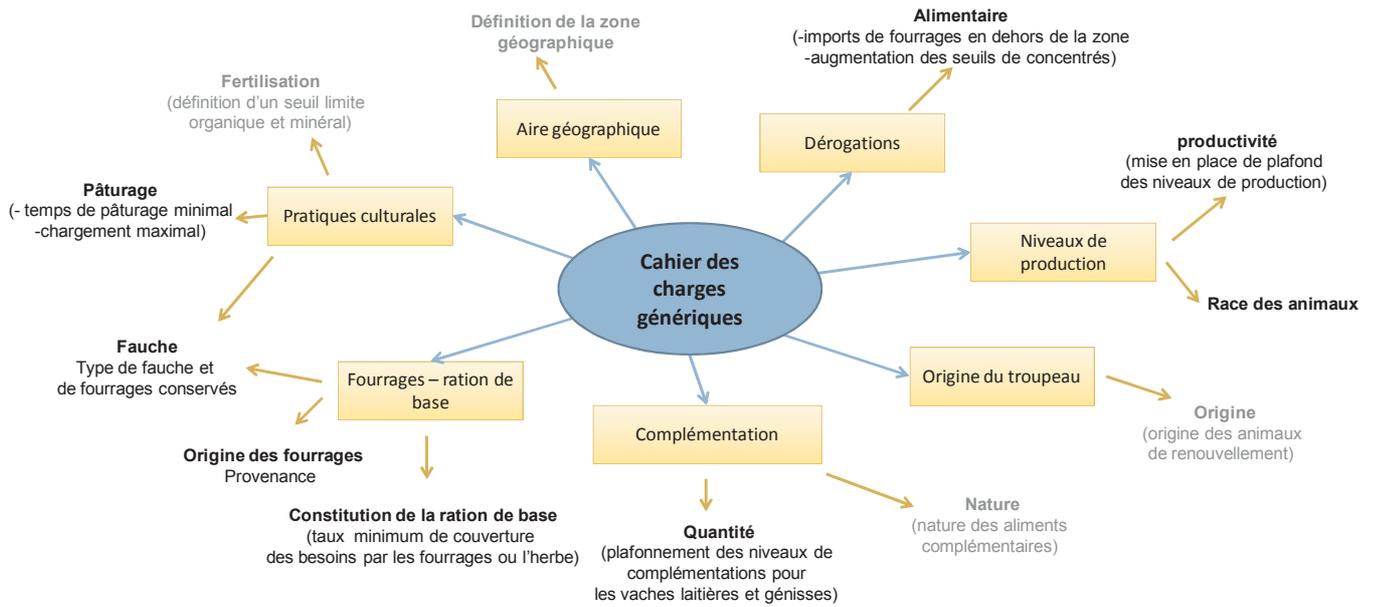


Figure 1: Principaux déterminants des cahiers des charges AOP et leurs pratiques associées – les éléments en noir sont inclus dans le modèle contrairement aux éléments en gris

Lors de la construction du modèle, nous avons pris en compte ces pratiques imposées pour pouvoir simuler des situations où les systèmes de production peuvent adhérer à un cahier des charges. Par exemple, nous avons instauré des règles de gestion des fauches laissant la possibilité de récolter et conserver des fourrages fermentés ou de ne récolter que des fourrages secs. Nous avons construit le système d'alimentation des animaux en incluant les règles sur la composition des rations de base et sur la limitation des apports de concentrés. La race des animaux n'est pas prise en compte en tant que telle, mais nous avons néanmoins la possibilité de décrire les animaux par leur poids adulte moyen, leur note d'état et leur niveau de production. Les règles de gestion incluant ces contraintes de production sont détaillées dans le chapitre 6.

4.1.1.2 Contraintes géographiques

Les contraintes pédoclimatiques et géographiques en montagne influencent l'utilisation du parcellaire, l'allocation des parcelles à un usage spécifique et peuvent en restreindre le champ des utilisations (Fleury *et al.*, 1996, Andrieu, 2006, Gueringer *et al.*, 2009) comme l'illustre la Figure 2. Un système de production fortement contraint présente peu de marge de manœuvre dans l'allocation des parcelles à tel ou tel usage, réduisant ainsi les capacités adaptatives du système fourrager.

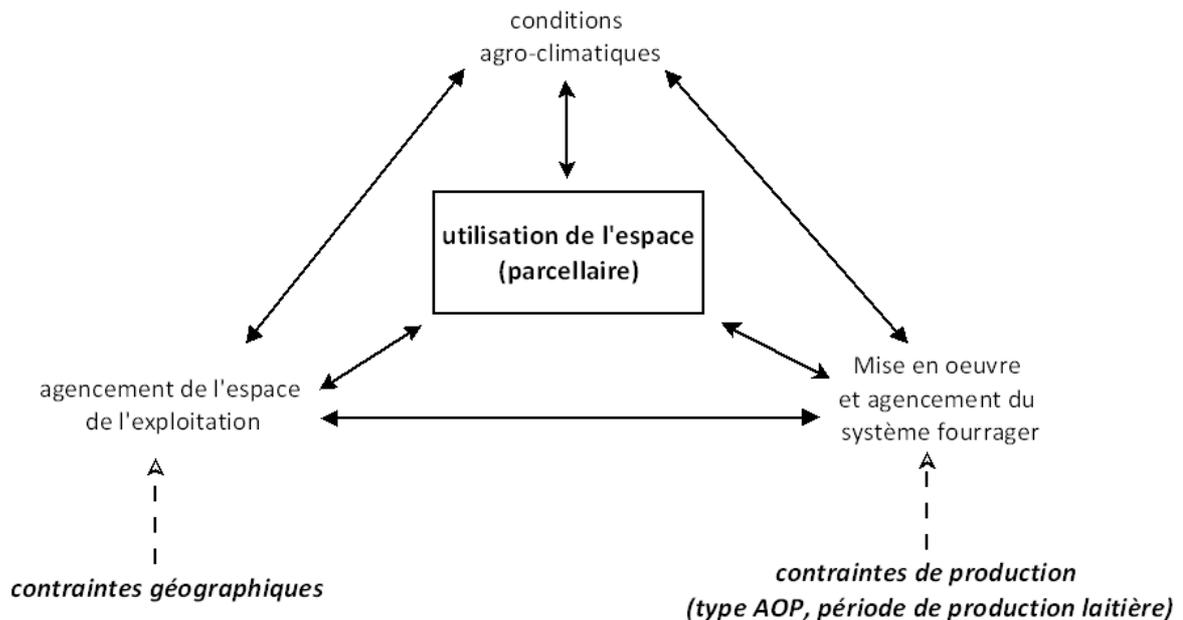


Figure 2: Influences des contraintes géographiques, agro-climatiques et de production sur l'usage des parcelles - schéma adapté de Gueringer *et al.* (2009)

Il convient ainsi de prendre en compte ces contraintes et de les traduire à travers l'usage possible des parcelles. Cependant, contrairement aux travaux effectués par Andrieu (2006) sur la « *diversité du territoire de l'exploitation d'élevage et sensibilité du système fourrager aux aléas climatiques* », dans lesquels les processus décisionnels mis en œuvre par l'éleveur pour affecter les usages possibles d'une parcelle avaient été modélisés, nous avons choisi d'analyser *a priori* les contraintes agissant sur l'allocation des parcelles à un usage. Ce choix nous permet ainsi de tester une grande diversité de parcellaires : du plus contraignant au plus souple, tout en nous permettant également de retranscrire le parcellaire d'une exploitation réelle.

L'usage d'une parcelle est ainsi déterminé selon différents critères tels que la pente, la portance, la surface de la parcelle, l'altitude, l'éloignement par rapport au siège d'exploitation (Brunschwig *et al.*, 2002, Andrieu, 2006, Garcia-Launay *et al.*, 2011). Trois types d'usage sont possibles : les parcelles dédiées uniquement à la fauche, celles allouées uniquement au pâturage et enfin les parcelles mixtes où le pâturage et la fauche sont possibles. Au sein des parcelles uniquement consacrées au pâturage,

certaines sont dédiées à un lot spécifique comme le montre la Figure 3. Ainsi, les parcelles uniquement pâturables, proches du siège et de petite surface sont par exemple majoritairement consacrées aux veaux ou aux petites génisses (Garcia-Launay *et al.*, 2011). A contrario, les parcelles non mécanisables, éloignées et difficiles d'accès comme les estives sont réservées aux génisses de deux ans et plus (Brunschwig *et al.*, 2002, Garcia-Launay *et al.*, 2011).

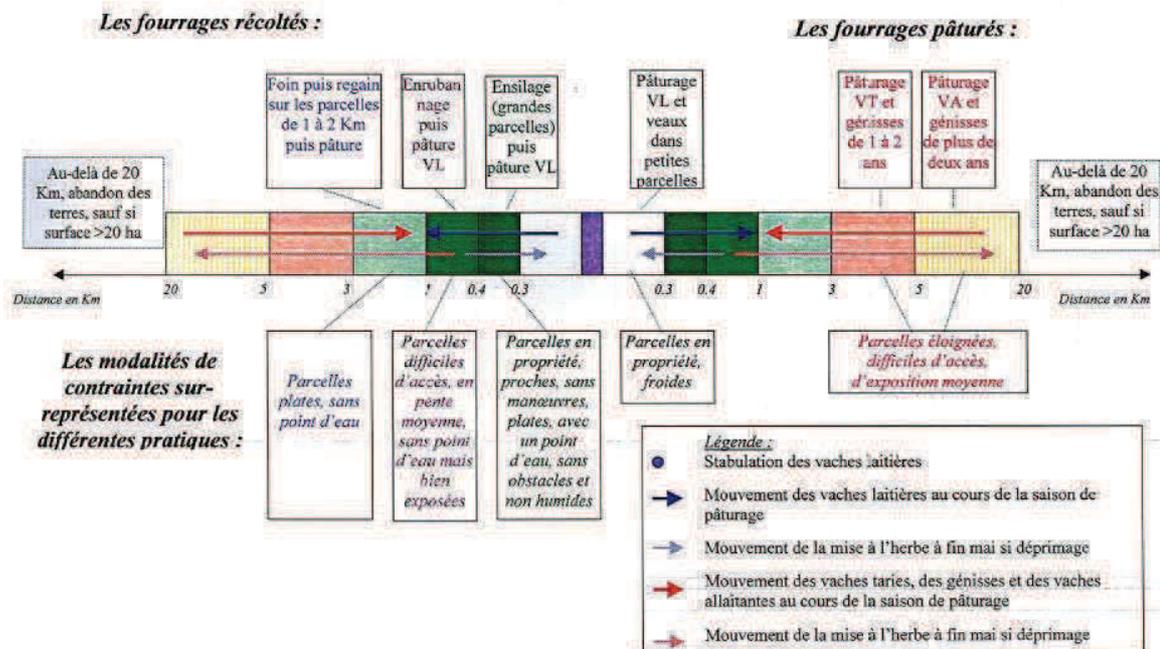


Figure 3: contraintes physiques agissant sur les usages possibles des parcelles (Brunschwig *et al.*, 2002)

4.1.2 Principaux choix de modélisation et définition des frontières du système

Le modèle, développé à l'échelle de l'exploitation, est centré sur les interrelations entre le système de production ou les éléments biotechniques (troupeau laitier, ressources alimentaires et offertes par les prairies) et la conduite par l'éleveur. Le modèle est ainsi construit sur la base d'un couplage entre le système de production et le système de gestion. Ce couplage constitue une relation dynamique et adaptative entre la composante décisionnelle et les éléments de production. Ainsi l'éleveur est représenté en tant que système décisionnel, il planifie les objectifs de production et gère le pilotage et le contrôle des systèmes biotechniques de façon à atteindre ces objectifs. L'éleveur regroupe ainsi l'ensemble du corps de règles (Figure 4). Ces objectifs et le paramétrage du corps de règles de pilotage sont définis dans le scénario. Le scénario contient également les contraintes spécifiques attenantes à un cahier des charges relatif à une démarche de qualité comme l'apport de concentrés autorisé par an et par animal ou le type de fourrages conservés utilisés.

Les éléments biotechniques, à savoir les prairies formant le parcellaire, les stocks fourragers et le troupeau laitier sont définis en entrée du simulateur. Les principaux intrants de ces sous-systèmes sont les denrées alimentaires (concentrés et fourrages en cas de besoin). Les sorties des sous-systèmes sont les ventes de fourrages quand la capacité de stockage est atteinte, la vente des animaux de réforme et des animaux non nécessaires au renouvellement et enfin le lait.

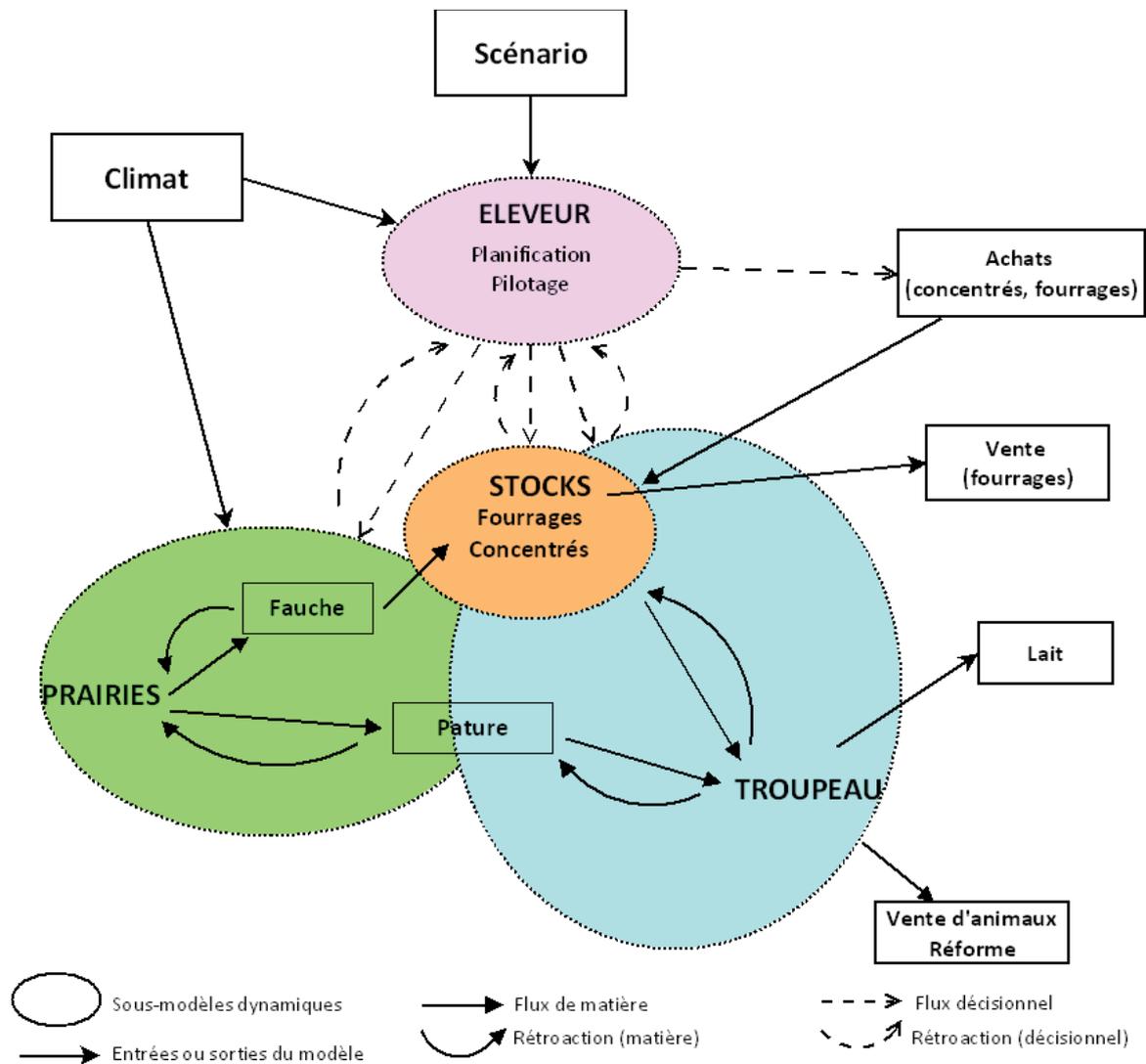


Figure 4 : Disposition du modèle basé sur les interrelations entre les composants dynamiques des sous-modèles et des processus décisionnels

En résumé, le simulateur Dynamilk développé est un **modèle dynamique intra-annuel se reproduisant d'années en années**, la structure de l'élevage et les règles de pilotage ne variant pas au cours des années successives. Seules les données climatiques sont variables d'une année sur l'autre. Le modèle est **déterministe** et **mécaniste**. Il fonctionne selon un pas de temps **discret**, la journée, permettant de gérer plus facilement les actions sur et entre les systèmes biotechniques (pousse de l'herbe, production journalière de lait, déplacement des lots de parcelles en parcelles...).

4.2 Formalisation du modèle global

4.2.1 Du modèle au simulateur Dynamilk : utilisation de l'approche objet

4.2.1.1 Définition des concepts de la modélisation orientée objet

Afin de matérialiser le système étudié en un modèle, nous avons utilisé la méthode de la **modélisation orientée objet**. Cette méthode englobe la phase d'analyse du système étudié, de son fonctionnement et de ses objectifs de modélisation associés, et la phase de conception. Le résultat de ces deux phases peut être exprimé grâce à l'utilisation d'un langage : l'**UML** (Unified Modeling Language ou Langage de Modélisation Unifié). L'UML est un langage de modélisation graphique à base de pictogrammes permettant la notation standard pour la modélisation des applications construites à l'aide d'objets (Muller, 1999, Blanco, 2010).

Le principe de la modélisation orientée objet est d'associer les variables d'un modèle aux fonctions qui opèrent sur ces variables. Un objet est défini en tant qu'unité distincte, ayant une identité propre, formée de l'union d'un état et d'un comportement (Muller, 1999). L'état regroupe les valeurs à un instant t de tous les attributs qui sont l'ensemble des informations qualifiant l'objet. Le comportement de l'objet est défini par le regroupement de toutes les compétences ou fonctions de l'objet décrivant ses actions et ses réactions que nous nommons méthodes (Muller, 1999, Chardon, 2008). Les propriétés, attributs et méthodes, communes d'un ensemble d'objets sont centralisées au niveau de la classe. En d'autres termes, la classe décrit le domaine de définition d'un ensemble d'objet réunissant les informations générales alors que les objets contiennent leurs particularités propres (Muller, 1999). La classe permet de construire les objets informatiques lors du processus d'instanciation. Pour illustrer ces concepts appliqués aux systèmes de production, le parcellaire peut être considéré comme une classe regroupant les informations et méthodes générales et la parcelle est alors un objet avec des attributs (surface, nom, usage...) et des méthodes (faire pousser le couvert herbacé, faucher...) spécifiques.

Le langage UML permet de décrire l'architecture du modèle en définissant les classes et leurs objets, leurs fonctions à travers différents diagrammes (Sigaud, 2007). Parmi ces diagrammes, se trouvent:

- ♦ Le diagramme de classes apportant une vue structurelle et statique du système étudié comportant les classes, les objets, leurs attributs et méthodes, ainsi que les relations entre les classes
- ♦ Le diagramme de séquences apportant une vue fonctionnelle du système. Ces diagrammes ont pour objectif de retranscrire la chronologie du déclenchement d'évènements au sein du système (entre les objets et les classes) et la période d'activité de ces événements.

- ♦ Le diagramme d'état apportant une vue dynamique. Ce diagramme recense tous les états possibles d'un objet spécifique ainsi que tous les évènements déclenchant ces changements d'état.

Par conséquent, l'utilisation du langage UML présente l'avantage de formaliser le système selon les objectifs choisis. Ce langage permet de matérialiser les composants du système, organisés en classes et objets définis par leurs attributs et leurs fonctions (caractéristiques, actions, relations, réactions...) et leurs évolutions au fil du temps déterminés par la finalité du système global. Ce langage permet également de construire le modèle par « brique ». En effet, les données et les relations relatives à un objet restent privées et ne sont pas accessibles au reste du modèle. Il est ainsi assez aisé de sophistication ou remplacer une brique par une autre sans changer le reste du modèle et son fonctionnement, du moment que les relations de l'objet avec le reste du modèle restent identiques. Ces relations de l'objet avec l'extérieur sont alors déclarées publiques.

4.2.1.2 Modélisation orientée objet appliquée à une exploitation laitière

A partir du modèle conceptuel décrit dans ce chapitre, nous avons formalisé le système à modéliser selon nos objectifs de modélisation. La Figure 5 présente cette formalisation à travers le diagramme de classe.

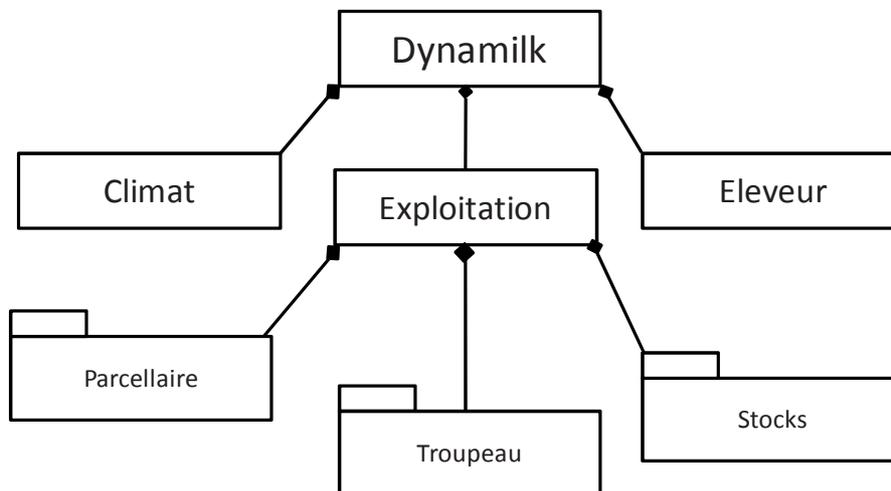


Figure 5 : Diagramme de classes du simulateur Dynamilk présentant son architecture

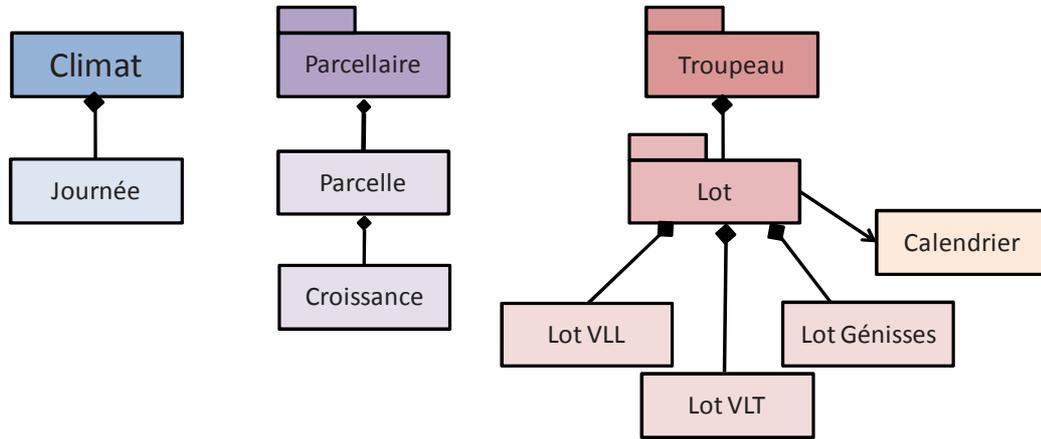


Figure 6: Décomposition des principales classes en objets

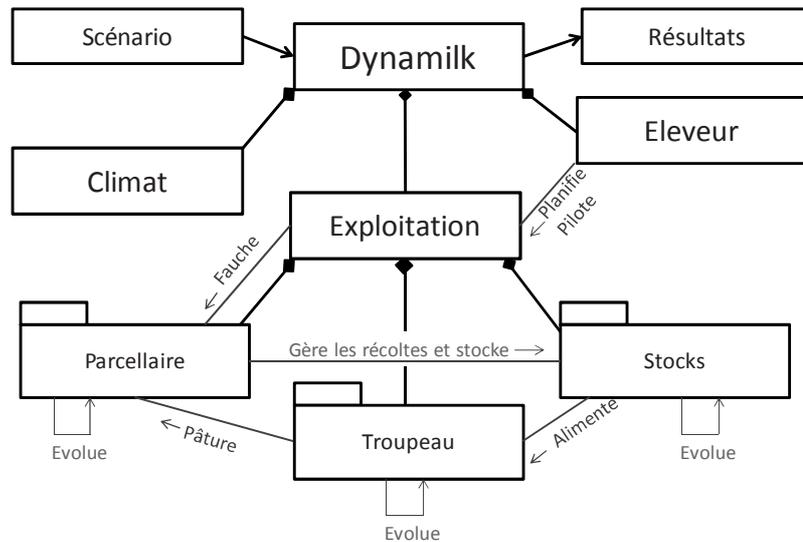


Figure 7: Principales relations (ou méthodes) entre les différentes classes ou objets de Dynamilk

Pour des raisons de simplification d'écriture de cette partie, les objets ou classes sont appelés directement par leur nom en italique. Par exemple, l'objet simulateur sera ainsi noté *simulateur*.

Dynamilk est composé de classes et d'objets (Figure 5 et Figure 6) en interrelations (Figure 7) décrits ci-dessous :

◆ Le simulateur

Le *simulateur* est le moteur de Dynamilk : il déclenche à la fois la simulation et impose la cadence.

Il importe les données d'entrée du simulateur, telles que les données climatiques, le scénario comportant les objectifs de production et les éléments de paramétrage du pilotage, les caractéristiques du parcellaire et des parcelles ainsi que les données démographiques du troupeau. Cet import de données lui permet de construire l'objet *exploitation* ainsi que le dossier *résultats*. Un enregistrement des résultats pour chaque variable voulue est effectué chaque jour simulé.

L'objet « *simulateur* » provoque toutes les actions à effectuer au pas de temps voulu et il détermine les périodes d'activité de certains évènements. Brièvement, il ordonne la pousse de l'herbe chaque jour et détermine les périodes de fauches ou de pâturage possibles. Il impose également le passage d'une saison à une autre et amorce toutes les actions associées à cette nouvelle saison. Le fonctionnement chronologique et l'enchaînement des actions lors de la simulation sont présentés dans la Figure 8.

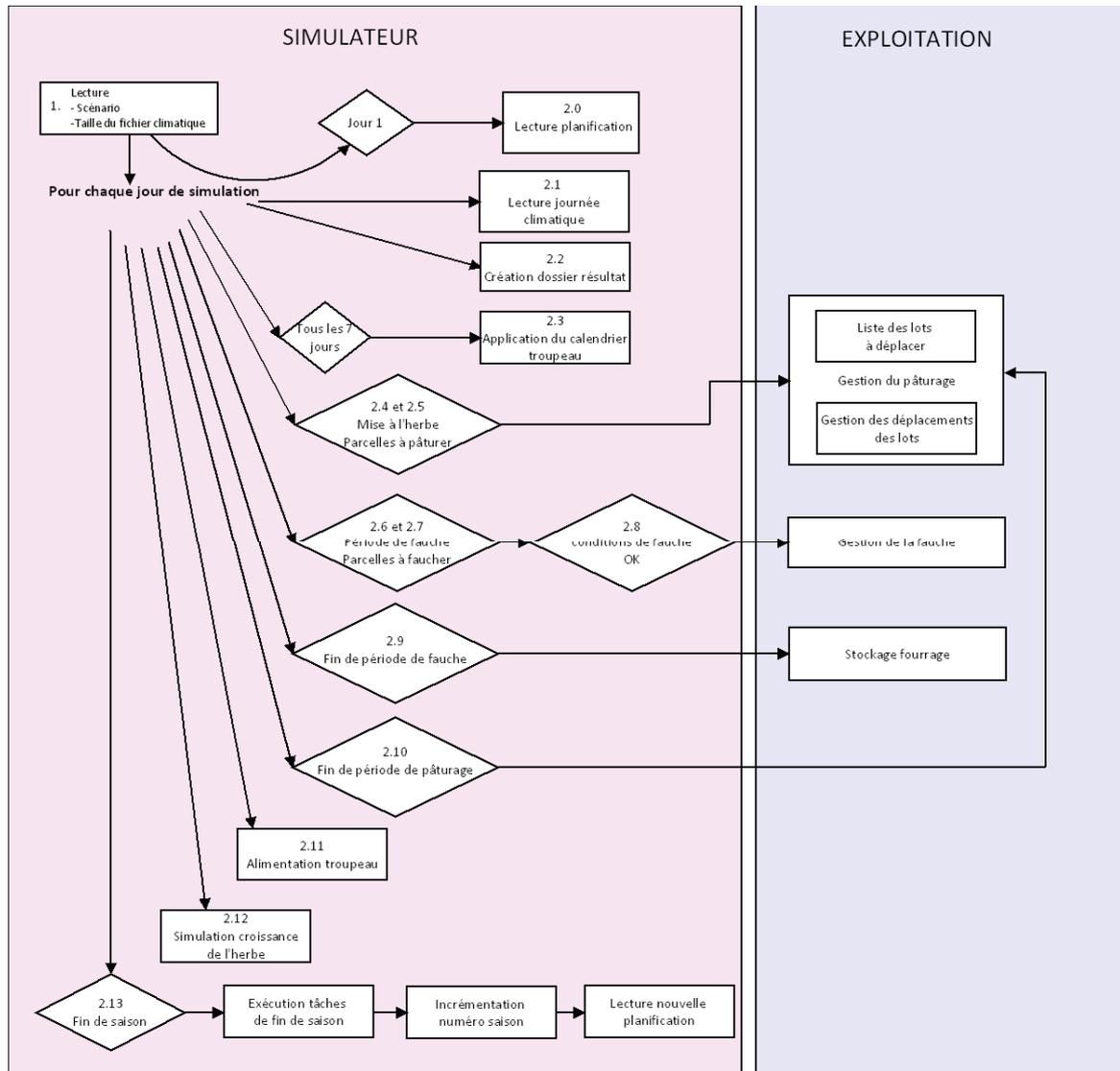


Figure 8 : Schéma de fonctionnement chronologique de la simulation

◆ Le climat

La fonction principale de cette classe est de récupérer le fichier climatique, entrée du modèle et de créer, pour chaque jour de simulation, un objet « *journée climatique* ». Cet objet contient alors les attributs climatiques nécessaires au bon fonctionnement du reste du modèle comme la croissance de l'herbe.

◆ L'exploitation

L'*exploitation* est l'objet structurel du modèle. En relation avec les données d'entrées importées et transmises par le *simulateur*, il permet de construire les classes correspondant aux sous-systèmes biotechniques : le *parcellaire*, les *stocks ou fourrages* et le *troupeau*. Cet objet est la matérialisation de l'éleveur. Il centralise tous les processus décisionnels à travers le pilotage des sous-systèmes biotechniques en tenant compte des paramètres du scénario importés par le *simulateur*. Les principales méthodes de cet objet sont attenantes à la gestion du pâturage (mise à l'herbe, déplacements de lots de pâtures en pâtures, rentrée à l'étable), à la gestion des fauches et à la gestion du stockage des fourrages récoltés (tri des fourrages, état des stocks, achat ou vente de fourrages).

Les deux autres classes représentent chacune les sous-systèmes biotechniques du modèle : les sous-modèles « parcellaire » et « troupeau », reliés entre eux par l'objet *stocks*. Seule une présentation rapide de ces sous-systèmes est effectuée dans cette partie afin d'exposer leurs principales composantes et méthodes. Leur fonctionnement est détaillé dans la partie 4.2.3 pour le sous-modèle « parcellaire », dans le chapitre 5 pour le troupeau, tout comme le pilotage et les aspects décisionnels de l'éleveur qui sont développés plus précisément dans le chapitre 6.

◆ Le parcellaire

La classe *parcellaire* inclut l'ensemble des parcelles. Cette classe instancie chaque *parcelle* à partir du fichier d'entrée définissant les parcelles et leurs caractéristiques (surface, usage, spécificités agronomiques, usage planifié). Le *parcellaire* fait également appel à l'objet *Ftype*. Cet objet comporte les 27 paramètres attenants aux quatre groupes fonctionnels permettant de décrire la composition botanique des couverts herbacés des parcelles. *Ftype* est donc en quelque sorte une bibliothèque de paramètres. Chaque parcelle est décrite selon une proportion des quatre groupes fonctionnels. Les paramètres moyens de chaque parcelle sont ensuite calculés par l'objet *parcelle* en effectuant la moyenne pondérée pour chaque paramètre selon la proportion de présence de chaque groupe fonctionnel (Jouven *et al.*, 2006a). Ces paramètres sont utilisés lors du calcul de la croissance de l'herbe par la suite. Ce calcul s'effectue dans l'objet *croissance* relié à une parcelle.

◆ Le troupeau

La classe *troupeau* permet de construire les différents lots d'animaux. Sa fonction principale est d'appliquer le calendrier aux différents lots. Le *calendrier* est construit sur la même philosophie que les *jours climatiques*. Il crée une liste comportant les informations démographiques caractérisant les différents lots à partir des données d'entrées du simulateur. Ces informations proviennent du modèle de démographie statique qui est présenté dans le chapitre 5. Le *calendrier* est créé tous les 7 jours.

Le troupeau instancie le lot de référence. Ce lot contient les attributs et les méthodes communes à tous les lots d'animaux comme le nom du lot, l'effectif par exemple. Le troupeau est décomposé en trois lots d'animaux : les vaches laitières en lactation, les vaches laitières tarées et les génisses.

◆ Les stocks

L'objet *fourrages* ou *stocks* sert à gérer les fourrages récoltés lors de la fauche. Il existe trois stocks différents : le foin de première coupe, de bonne et de moins bonne qualité et les regains. Ces fourrages sont caractérisés par leur quantité (en kg MS) et leur digestibilité. Les méthodes principales sont le stockage et le déstockage des différents fourrages.

4.2.2 Implémentation du modèle

A partir de l'analyse objet et du cahier des charges technique qui en découle, le modèle a été ensuite implémenté. Le développement du simulateur a été réalisé conjointement et en collaboration étroite avec deux informaticiennes-développeuses : Marie-Agnès Blanco, stagiaire de l'**ISIMA** (Institut Supérieur d'Informatique de Modélisation et de leurs Applications) et Anne Lamadon (**INRA-UMRH** Equipe Sybel).

Le simulateur a été développé en utilisant le langage informatique **Java**. Ce choix fut motivé par le fait que Java est un langage de programmation purement orienté objet et qu'il est portable sur tous les systèmes d'exploitation. De plus, l'une des ambitions affichées lors du développement du simulateur était de pouvoir réutiliser, améliorer et poursuivre le simulateur à l'issue du travail de thèse. L'utilisation de Java, langage très usité, et le développement par les deux informaticiennes d'un code informatique bien commenté permettront l'évolution du simulateur.

L'environnement de développement intégré (EDI) utilisé pour implémenter le simulateur Dynamilk est Eclipse. Eclipse est originellement dédié au langage Java. Cet EDI est très utilisé dans le domaine du développement informatique, et existe en open-source.

4.2.3 Exemple d'application de l'approche objet : le sous-modèle *parcellaire*

4.2.3.1 Description du parcellaire et des parcelles

Outre les contraintes géographiques à prendre en compte, l'attribution d'une parcelle à un ou des usages précis s'effectue également en fonction des objectifs de production de l'éleveur. L'éleveur effectue ces allocations lors de la planification de la production des aliments pour le troupeau (Coleno et Duru, 1998). Il va ainsi dimensionner les surfaces allouées en fonction de son système d'élevage (répartition des besoins du troupeau au cours de l'année, nombre de lots, types de fourrages récoltés, fourrages autorisés...). Cette planification des usages des parcelles est déclinée par saisons. Par exemple, une parcelle mixte peut être successivement déprimée par un lot, puis fauchée et enfin être de nouveau allouée au pâturage. Ainsi le simulateur intègre la notion de saison associée à un usage, concept encore appelé **saison-pratique** (Bellon *et al.*, 1999). Ce concept permet de rendre compte de la dynamique de production et de l'utilisation des ressources fourragères au cours de la période de pousse de l'herbe (Bellon *et al.*, 1999, Léger *et al.*, 2000). La définition des saisons et du passage d'une saison à une autre est détaillée dans le chapitre 6 présentant la conduite du système d'élevage.

Ainsi un parcellaire peut être schématisé comme le montre la Figure 9 en fonction de la distance des parcelles par rapport au siège et de leurs usages attribués (ici le cas d'une exploitation comportant 20 parcelles). Ce parcellaire est ensuite retranscrit dans un fichier d'entrées utilisé par le simulateur (Figure 10).

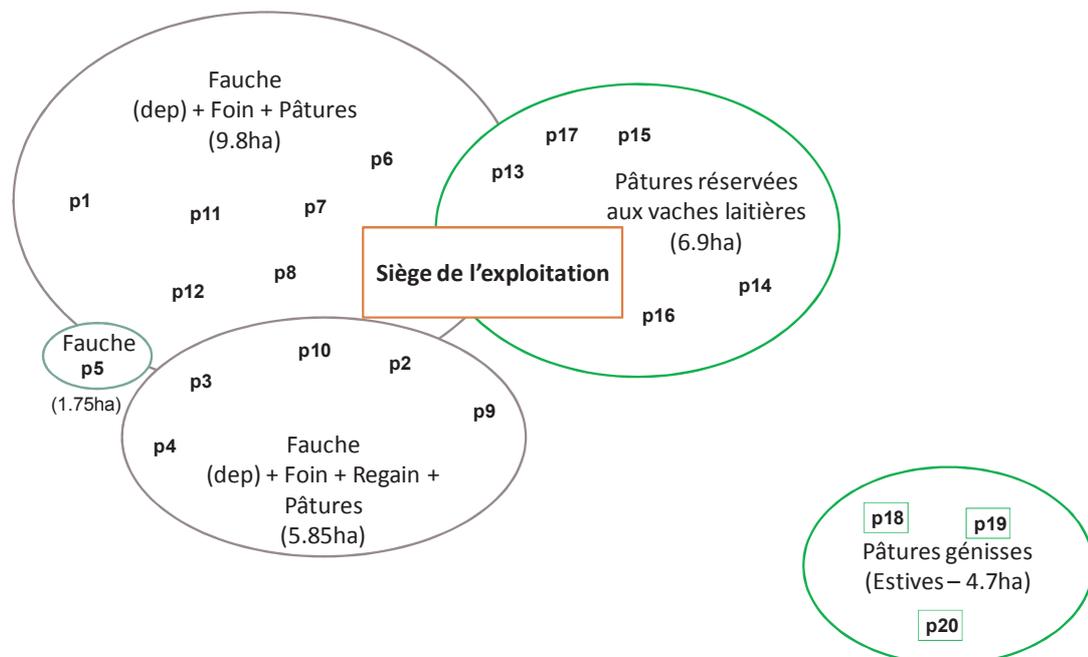


Figure 9: Schéma simplifié de l'organisation géographique et utilitaire du parcellaire

parcelle	surface (ha)	descriptif	usage Deprimage	usage Printemps		usage Été		usage Automne	
p1	1.75	.	R	fauche	precoce	paturage	.	paturage	VL
p2	1	.	R	fauche	precoce	fauche	.	paturage	VL
p3	1.8	.	R	fauche	precoce	fauche	.	paturage	.
p4	1.25	.	R	fauche	precoce	fauche	.	paturage	.
p5	1.75	.	R	fauche	.	fauche	.	fauche	.
p6	1.5	.	deprimage	fauche	.	paturage	VL	paturage	VL
p7	1	.	deprimage	fauche	.	paturage	VL	paturage	VL
p8	2	.	deprimage	fauche	.	paturage	VL	paturage	VL
p9	0.5	.	R	fauche	.	fauche	.	paturage	VL
p10	1.3	.	R	fauche	.	fauche	.	paturage	VL
p11	1.75	.	R	fauche	.	paturage	VL	paturage	VL
p12	1.8	.	R	fauche	.	paturage	VL	paturage	VL
p13	1.7	pature VL	paturage	paturage	VLL	paturage	VLL	paturage	VLL
p14	1	pature VL	paturage	paturage	VLL	paturage	VLL	paturage	VLL
p15	0.8	pature VL	paturage	paturage	VL	paturage	VL	paturage	VL
p16	2	pature VL	paturage	paturage	VL	paturage	VL	paturage	VL
p17	1.4	pature VL	paturage	paturage	VL	paturage	VL	paturage	VL
p18	1.2	pature autre	paturage	paturage	Ge	paturage	Ge	paturage	Ge
p19	2	pature autre	paturage	paturage	Ge	paturage	Ge	paturage	Ge
p20	1.5	pature autre	paturage	paturage	Ge	paturage	Ge	paturage	Ge

Figure 10 : Fichier d'entrée descriptif des parcelles avec les usages possibles des parcelles selon les saisons

4.2.3.2 *Le module de croissance de l'herbe*

Selon la méthodologie orientée objet, à chaque parcelle est associé un module de croissance de l'herbe. Ce module a été disjoint de l'objet parcelle pour pouvoir le modifier ou le remplacer si nous le voulions. Cependant, nous avons tenu à conserver le module de croissance de l'herbe développé lors de la construction du modèle SEBIEN au cours de la thèse de Jouven (2006). Ce choix fut motivé par le fait que ce modèle était déjà implémenté, validé et publié (Jouven *et al.*, 2006a et 2006b). En outre, ce modèle est parfaitement fonctionnel et paramétré pour simuler des conditions de prairies permanentes situées en zone de montagnes. Il permet de simuler différents types de végétations plus ou moins productives, de valeur alimentaire plus ou moins élevée et de développement plus ou moins précoce. Il permet donc de simuler l'hétérogénéité entre parcelles au sein du parcellaire, mais il considère la parcelle comme un ensemble homogène et ne permet donc pas de simuler l'hétérogénéité intra-parcelle.

Ce modèle prévoit les dynamiques de la production, de la structure et de la digestibilité du couvert herbacé. Les entrées de ce sous-modèle, présenté dans la Figure 4 et la Figure 12 sont :

- ◆ **La composition botanique et les caractéristiques agronomiques:**

Une parcelle et son couvert herbacé sont décrits par la composition botanique représentée par une proportion des quatre types fonctionnels (A, B, C, D) définis par Cruz *et al.* (2002), l'index de nutrition azotée et la réserve utile du sol.

- ◆ **Les données climatiques :**

Les données climatiques nécessaires au module de croissance de l'herbe se trouvent dans la liste *journée climatique* de la classe *Climat* avec la température, les précipitations, le rayonnement et l'évapotranspiration.

- ◆ **L'état initial du couvert herbacé :**

Les informations sur l'état initial de la biomasse et de l'âge de la biomasse sont nécessaires à l'amorçage de la simulation de la pousse de l'herbe. Ces informations sont obtenues à partir d'une caractérisation du couvert herbacé de la prairie (prairie de fauche riche, prairie de pâture pauvre...) réalisée par Jouven *et al.*, (2007) et Farruggia *et al.*, (2006).

Une fois les caractéristiques de la végétation définies, la biomasse herbacée de la parcelle est modélisée par quatre compartiments structurels: le végétatif et le reproducteur d'une part, le vert et le sec d'autre part, permettant de prendre en compte les phénomènes de croissance, de sénescence et d'abscission. Ces quatre compartiments sont qualifiés par leur contribution en biomasse, leur âge et leur digestibilité de la biomasse. Ces trois variables sont respectivement exprimées en $\text{kg MS}\cdot\text{ha}^{-1}$, degré-jour et en $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ (Jouven *et al.*, 2006a).

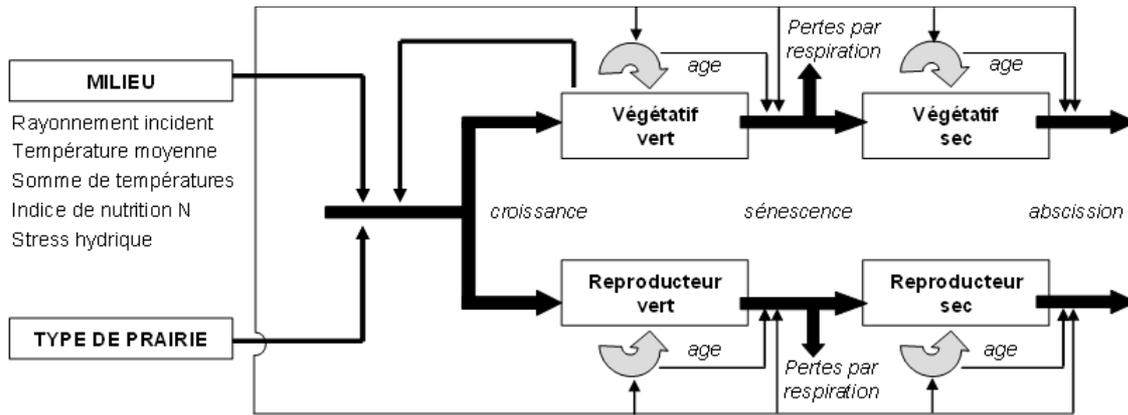


Figure 11: Diagramme de fonctionnement du modèle représentant les flux. Les compartiments structurels sont représentés par les boîtes, les flux de biomasses par les flèches pleines et les fonctions associées à l'âge de la biomasse par les flèches blanches. Les phénomènes rétroactifs ou les actions directes des variables sont représentées par les flèches fines. (Jouven *et al.*, 2006a)

La croissance du couvert herbacé est modélisée selon une approche basée sur l'efficacité de l'utilisation de la lumière modulée selon les saisons. Le flux de croissance est modulé par une fonction intégrant les facteurs environnementaux liés au climat (température, précipitations), à la saison (allocation de la croissance à la biomasse aérienne ou souterraine selon la période de l'année), du sol (fertilité, réserve utile). La précision de prévision du modèle a été estimée à 0.5 T MS.ha^{-1} pour la biomasse et à 0.02 g.g^{-1} pour la digestibilité de la matière organique (Jouven *et al.*, 2006b).

parcelle	RU	IN	%groupA	%groupB	%groupC	%groupD	bmGV	bmDV	bmGR	bmDR	ageGV	ageDV	ageGR	ageDR
p1	80	0.84	30	40	30	0	650	560	0	0	470	430	0	0
p2	80	0.84	30	40	30	0	650	560	0	0	470	430	0	0
p3	80	0.84	30	40	30	0	650	560	0	0	470	430	0	0
p4	80	0.84	30	40	30	0	650	560	0	0	470	430	0	0
p5	80	0.71	10	40	50	0	650	560	0	0	470	430	0	0
p6	80	0.71	10	40	50	0	650	560	0	0	470	430	0	0
p7	80	0.84	30	40	30	0	650	560	0	0	470	430	0	0
p8	80	0.84	30	40	30	0	650	560	0	0	470	430	0	0
p9	80	0.71	10	40	50	0	650	560	0	0	470	430	0	0
p10	80	0.71	10	40	50	0	650	560	0	0	470	430	0	0
p11	80	0.71	10	40	50	0	650	560	0	0	470	430	0	0
p12	80	0.84	30	40	30	0	650	560	0	0	470	430	0	0
p13	80	0.8	50	50	0	0	650	560	0	0	580	520	0	0
p14	80	0.84	30	40	30	0	650	560	0	0	580	520	0	0
p15	80	0.67	20	20	50	10	580	780	0	0	580	520	0	0
p16	80	0.67	20	20	50	10	580	780	0	0	580	520	0	0
p17	80	0.67	20	20	50	10	580	780	0	0	580	520	0	0
p18	60	0.55	5	10	65	20	580	780	0	0	580	520	0	0
p19	80	0.7	5	10	65	20	580	780	0	0	580	520	0	0
p20	80	0.7	5	10	65	20	580	780	0	0	580	520	0	0

Figure 12 : fichier d'entrée descriptif des parcelles avec la réserve utile (RU), l'indice de nutrition azotée (IN), la composition botanique des parcelles selon les groupes fonctionnels et l'état initial de la biomasse et son âge des quatre compartiments

CHAPITRE V

5 LE SOUS-MODELE

« TROUPEAU LAITIER »

5.1 Conception du modèle « troupeau laitier »

5.1.1 Cahiers des charges de la construction et objectifs du sous-modèle « troupeau laitier »

Pour représenter et modéliser le troupeau, il fallait que ce dernier soit représenté de façon simple, pour qu'il puisse être connecté au reste du modèle global, notamment pour qu'il puisse interagir avec le sous-modèle « ressources » composé des parcelles à pâturer et des stocks fourragers. L'objet d'étude étant l'exploitation laitière, il fallait prendre en compte l'ensemble du troupeau laitier : les vaches en lactation, mais aussi les vaches taries et les génisses de renouvellement. De plus, le sous-modèle « troupeau » devait être capable de simuler les périodes d'alimentation en stabulation et au pâturage, et leur enchaînement sans présenter d'interruption.

Comme vu dans le chapitre 4, le modèle troupeau laitier doit être capable de tenir compte d'une structure démographique et des performances zootechniques propres à chaque situation que nous voulons simuler.

5.1.2 Architecture du sous-modèle troupeau

Le sous-modèle troupeau est composé de 2 sous-modules reliés. Le premier module, appelé modèle démographique (Demographic structure model, Figure 1), définit la structure démographique du troupeau laitier en générant la matrice de démographie, ou matrice des effectifs, et certaines informations agrégées par lots ou catégories d'animaux. Le second module est le modèle animal avec le module dynamique d'ingestion et de production. Chaque lot d'animaux a une production spécifique, laitière pour les vaches en lactation (Intake and Milk production model, Figure 1), croissance pour les lots de génisses et maintien de l'état corporel et gestation pour les vaches taries. La Figure 1, ci-dessous, présente l'architecture du modèle pour les vaches en lactation.

Le modèle dynamique d'ingestion et de production interagit avec les éléments du modèle global relatifs à la composition de la ration alimentaire des animaux :

- Les aliments concentrés distribués pour chaque catégorie d'animal en lactation
- Les fourrages conservés, situés dans le module « stocks fourragers », composés de foins de 1^{ère} coupe bonne et moins bonne qualité, et de regains
- L'herbe des parcelles à pâturer, dont la biomasse et la digestibilité est gérée par le module de croissance de l'herbe, en interaction avec le prélèvement quotidien des animaux.

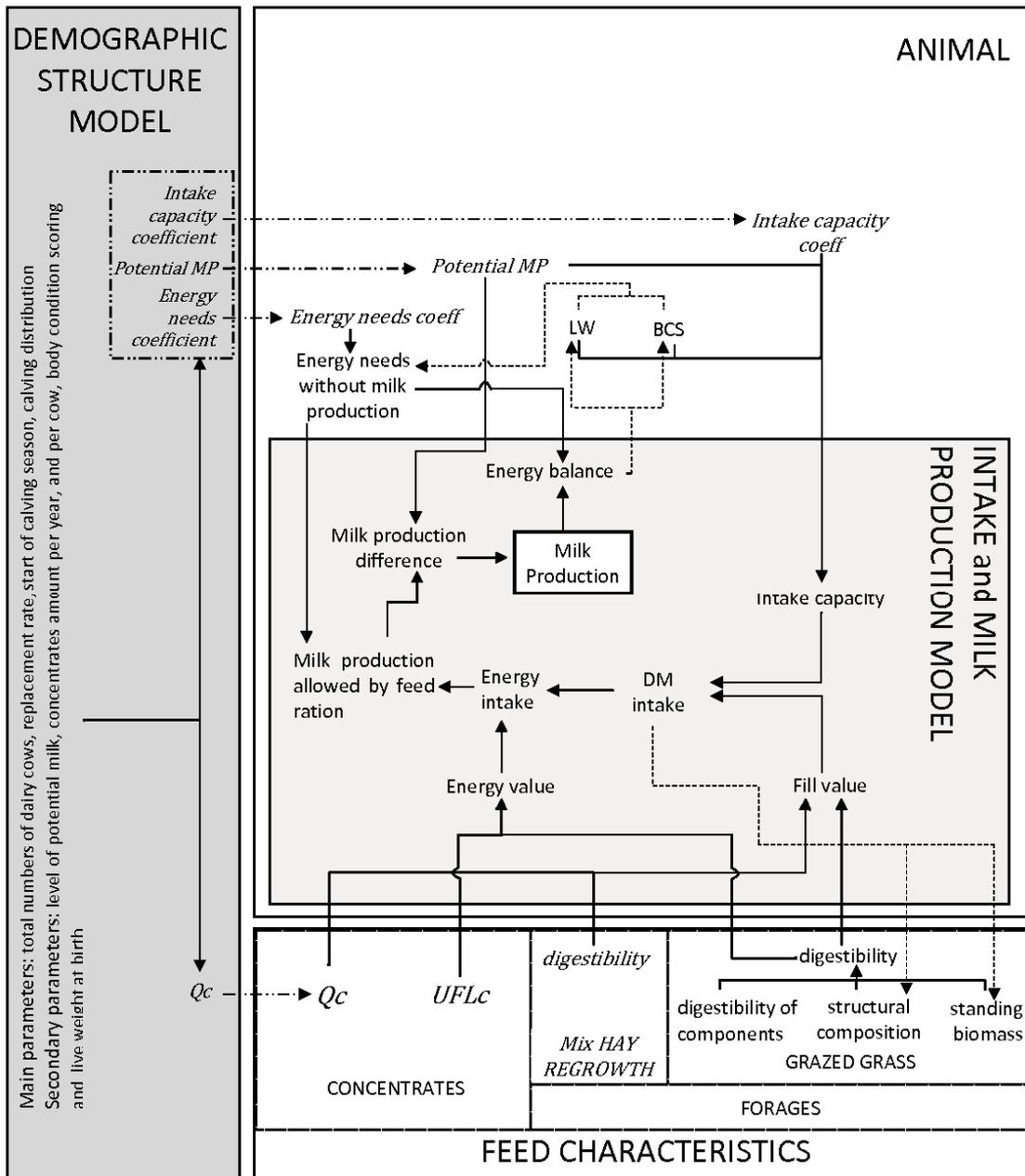


Figure 1: Structure du modèle animal "vache laitière" avec ses trois composants: le sous-modèle de démographie, les aliments de la ration et le sous-modèle dynamique d'ingestion et de production laitière

→ Relation calculatoire -.-.-> Donnée d'entrée - - - -> Boucle de rétroaction

5.2 Représentation du troupeau laitier : le module démographique

5.2.1 Choix de modélisation pour représenter le troupeau

5.2.1.1 *Modèle lot-centré*

Nous avons choisi le **lot** comme unité de simulation du modèle de troupeau. L'approche lot-centré permet de représenter le troupeau dans son ensemble et de simplifier la gestion des animaux d'un point de vue informatique. La planification de l'alimentation par lot se voit justifiée par l'un des objectifs du modèle qui est d'évaluer l'impact du management du troupeau par l'éleveur et de ses stratégies alimentaires sur les productions animales et fourragères ainsi que sur le bilan fourrager. De même, les sorties principales du simulateur sont : i) la production laitière réalisée ii) les quantités ingérées par les animaux liées à l'offre alimentaire déterminée par la dynamique de production fourragère et de la gestion des ressources par l'éleveur. A l'échelle de l'exploitation, les informations à l'échelle du lot sont suffisantes. Un autre aspect important de l'étude est la valorisation des surfaces fourragères et principalement des prairies pâturées par les animaux. L'échelle du lot permet de mettre en place des règles simples de gestion des déplacements d'animaux de parcelle en parcelle en évitant la destruction ou l'apparition éventuelles d'individus.

Le choix de l'échelle du lot est également cohérent avec les systèmes de production étudiés : les élevages laitiers herbagers en zone de montagne. Ces systèmes sont, ou tendent à être plus extensifs que les systèmes de plaine (García-Martínez *et al.*, 2009). De surcroît, dans le secteur laitier, les structures agricoles tendent depuis un trentaine d'années vers un agrandissement et vers une diminution de la main d'œuvre, phénomène également présent en zone défavorisée (Cournut *et al.*, 2005). Les agriculteurs recherchent donc à simplifier leurs conduites techniques, notamment leurs travaux d'astreinte, principalement traite et alimentation (Cournut *et al.*, 2005). Grouper les vêlages afin de conduire le troupeau en lots est une stratégie permettant d'alléger ces travaux d'astreinte en facilitant la gestion de l'alimentation et en permettant par exemple, la fermeture de la salle de traite pendant la période de tarissement (Disenhaus *et al.*, 2005).

5.2.1.2 Système d'allotement choisi

L'unité de simulation étant le lot, nous avons choisi de décrire le troupeau laitier par les lots fonctionnels (Cournut, 2001) selon leurs objectifs de production, présentés dans la Figure 2.

Le lot fondamental d'une exploitation laitière est bien sûr celui des **vaches laitières en lactation**. Tout le système de production est orienté autour du fonctionnement de ce lot. Le lot des vaches tarées est celui dont l'objectif est d'assurer la fin de la gestation entamée au cours de la lactation et de produire les animaux nécessaires au renouvellement. Le lot des **vaches tarées** est également celui pour lequel l'éleveur définit un objectif d'état corporel cible afin de permettre une bonne lactation une fois le vêlage passé. Les **génisses**, quant à elles, ont pour objectif de remplacer les vaches en lactation en fin de carrière. Elles ont également un rôle dans l'utilisation des ressources fourragères en étant de « bonnes utilisatrices » des surfaces herbagères de mauvaise qualité ou non accessibles pour les vaches laitières, mais aussi des fourrages de moins bonne qualité (Le Cozler *et al.*, 2009, Garcia-Launay *et al.*, 2011).

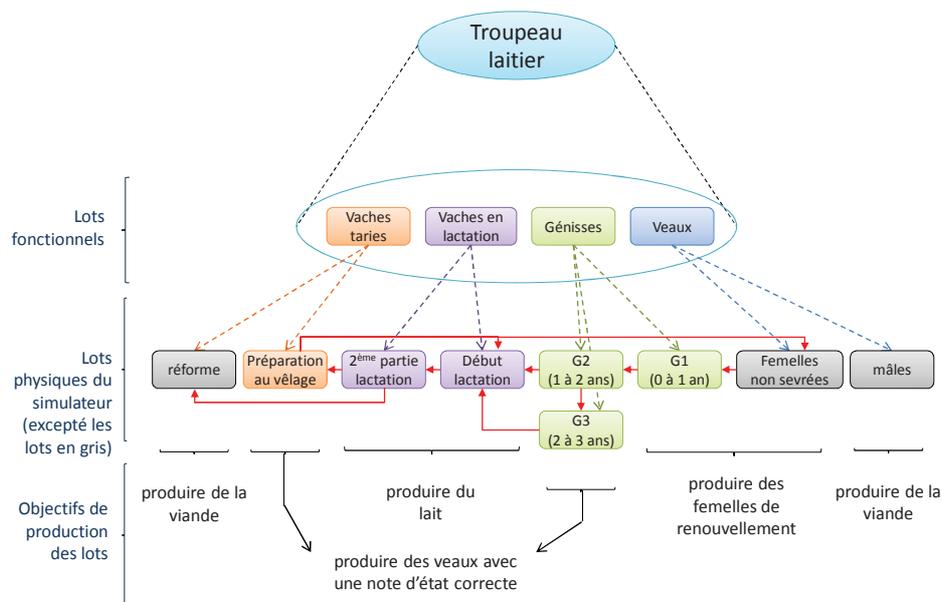


Figure 2: Représentation du troupeau laitier en lots fonctionnels et leurs productions associées (les flèches et accolades noires représentent les productions associées à chaque lot ; les flèches rouges représentent les flux démographiques chronologiques)

Les lots choisis sont :

- Les vaches laitières en lactation (VLL)
- Les vaches laitières tarées (VLT)
- Les génisses par catégories d'âge : G1 (0 à 1 an), G2 (1 à 2 ans) et G3 (2 à 3 ans) dans le cas d'un premier vêlage à 3 ans

Nous avons fait le choix de ne pas prendre en compte les veaux mâles et les vaches de réformes à l'engraissement. Le lot des velles (génisses de 0 à 1 an) n'apparaissent dans le modèle qu'à l'âge de 7 semaines, soit après leur sevrage (Agabriel et Meschy, 2007, Le Cozler *et al.*, 2009). En effet, le modèle d'ingestion et de croissance des génisses ne prend pas en compte l'alimentation lactée. Ces choix sont motivés par le fait que ces lots ne sont pas utilisateurs de ressources fourragères. Pour des raisons de simplification de la gestion de la démographie du troupeau visant à maintenir les effectifs d'une année sur l'autre, seules les génisses uniquement nécessaires au renouvellement sont conservées au sein du troupeau.

5.2.1.3 Cas du lot des vaches laitières en lactation

Le lot des vaches laitières en lactation est subdivisé en quatre catégories pour mieux modéliser les mécanismes de régulation de la production laitière et de mobilisation des réserves corporelles au cours de la lactation (Figure 3).

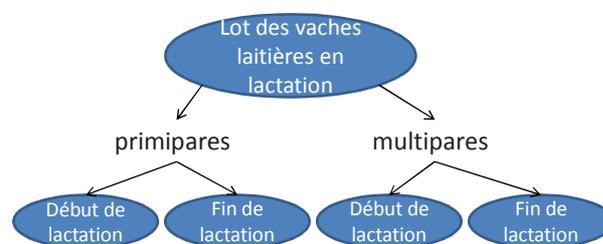


Figure 3: subdivision du lot des vaches en lactation en quatre catégories

Nous avons choisi de discriminer les animaux selon leur parité, primipares d'une part, et multipares d'autre part. Effectivement, les animaux primipares ont des spécificités qui les différencient des multipares, spécificités induisant des modifications de valeurs de paramètres dans les équations d'ingestion, de mobilisation ou de reprise d'état corporel et de production laitière. Les primipares ont en effet une capacité d'ingestion 80% inférieure à celle des multipares au cours des premières semaines de lactation (Andrieu *et al.*, 1976) confirmé par les travaux sur des vaches en début de lactation au pâturage de (McEvoy *et al.*, 2009). Les primipares, puisqu'elles ont une ingestion limitée, mobilisent plus rapidement leurs réserves corporelles afin de combler le déficit énergétique en début de lactation (McEvoy *et al.*, 2009). De surcroît, les primipares ont des caractéristiques physiques différentes des multipares qu'il convient de considérer lors du paramétrage du modèle. Ainsi, la note d'état au vêlage des primipares est bien souvent plus élevée que celle des multipares (Roche *et al.*, 2009) reflétant une meilleure préparation et une meilleure condition au moment du vêlage. A l'inverse, le poids vif est inférieur chez les primipares n'ayant pas atteint leur poids adulte (Agabriel et Meschy, 2007, Le Cozler *et al.*, 2009, Roche *et al.*, 2009) en cas d'un premier vêlage à 24 mois.

La phase de lactation a été découpée en deux parties. En effet, le début de lactation se caractérise par une dynamique d'évolution de la production laitière plus rapide que celle de l'ingestion d'énergie, du fait d'une capacité d'ingestion de l'animal limitée de l'animal dans les premières semaines suivant le vêlage (de Vries et Veerkamp,

2000, Reist *et al.*, 2002, Faverdin *et al.*, 2007a). La mobilisation des réserves corporelles en début de lactation est alors nécessaire pour répondre aux besoins de lactation (Faverdin *et al.*, 2007a, Friggens et Badsberg, 2007). La capacité d'ingestion des animaux augmente progressivement au cours des premières semaines de lactation permettant le retour à l'équilibre énergétique (Chilliard *et al.*, 1987, Faverdin *et al.*, 2011). Ce retour s'effectue entre 1 mois et demi et 3 mois post-partum (Faverdin *et al.*, 2007a, Buttchereit *et al.*, 2010, Gross *et al.*, 2011). La 2^{ème} partie de lactation est caractérisée par une production laitière observée qui dépend linéairement du niveau des apports énergétiques et de la production potentielle (Coulon et Remond, 1991).

En conclusion, nous avons choisi de former **quatre catégories d'animaux au sein du lot en lactation** : les primipares et les multipares d'une part, et dans chaque type, les animaux en début de lactation (jusqu'à la 12^{ème} semaine incluse) et ceux en deuxième partie de lactation (de la 13^{ème} à la 44^{ème} semaine de lactation) d'autre part.

5.2.2 Construction de la démographie du troupeau et allotement

5.2.2.1 Genèse de la matrice de démographie

La matrice de démographie générant la structure du troupeau est construite à partir de quatre paramètres :

- L'effectif moyen annuel du nombre de vaches laitières (vaches en lactation et vaches tarées)
- Le taux de renouvellement du nombre de vaches laitières (% de l'effectif moyen annuel)
- L'âge au premier vêlage avec seulement deux possibilités : 2 ans ou 3 ans
- La distribution des vêlages des primipares et des multipares (en % par semaines calendaires)

Cette matrice de démographie génère, à chaque pas de temps, les effectifs d'animaux de chaque lot, puis les effectifs au sein des catégories pour le lot des vaches en lactation. Puisque la distribution des vêlages est prise en compte pour générer cette matrice, nous connaissons en outre les **stades physiologiques** (semaine de lactation et de gestation, ainsi que l'âge) de chaque individu à chaque pas de temps.

Le pas de temps de cette matrice est **la semaine**, choix motivé par le fait que les équations utilisées dans le modèle dynamique d'ingestion et de production intègrent les stades physiologiques à un pas de temps hebdomadaire (calcul de production laitière potentielle, capacité d'ingestion, besoins...) (Faverdin *et al.*, 2007b).

5.2.2.2 *Contraintes imposées par ces choix de représentation*

De par sa construction, le modèle de démographie est indépendant et n'interagit pas avec le reste du simulateur. Il permet de générer les conditions initiales du troupeau et d'alimenter le simulateur en données d'entrée. Une fois paramétré, l'ensemble des feuilles de calculs n'évolue plus : les effectifs de chaque lot du troupeau et les calculs de stade physiologique restent identiques tout au long de la simulation. Le modèle démographique est ainsi strictement reproductible d'années en années (durée de lactation, d'intervalle vêlage-vêlage ou encore de tarissement identiques d'une année sur l'autre). Cependant, l'objectif de simulation étant de tester des scénarios de systèmes de production contrastés reposant sur une période de vêlages groupés, ces derniers doivent impérativement maîtriser l'un intervalle vêlage-vêlage pour éviter un taux de réforme trop important (Disenhaus *et al.*, 2005).

De même, cette structure fixe annuelle implique l'impossibilité de simuler des génisses ayant un âge au premier vêlage autre que 24 ou 36 mois, or les systèmes basés sur un premier vêlage vers 30 mois sont très fréquents (29 à 30 mois pour la moyenne nationale, (Le Cozler *et al.*, 2009)).

5.2.3 Le modèle démographique : une matrice de calculs des paramètres dépendant de la structure démographique

La description et le fonctionnement précis et détaillés du modèle de démographie se trouvent en annexe 3.

5.2.3.1 *Variables du modèle de démographie*

Le Tableau 1 présente un récapitulatif de l'ensemble des variables utilisées par le modèle de structure démographique.

Tableau 1: Présentation des variables d'entrée et de sorties du modèle de démographie

Nom	Unité	Description
Variables d'entrée du modèle		
Effectif	individu	Nombre de vaches laitières
Repla	%	Taux de renouvellement
Agevel	ans	Age au premier vêlage (2 ou 3 ans)
PLpot _{total}	kg.an ⁻¹	Potentiel laitier
SemDeb	Semaine calendaire	Semaine de début des vêlages
QC _{annuel}	kg.VLL ⁻¹ .an ⁻¹	Quantité totale de concentrés à distribuer par animal et par an
C _{rep}	coefficient	Coefficient de répartition de la quantité de concentrés à distribuer entre sur les périodes 1 à 12 et 13 à 44 semaines de lactation
NECvel	Note	Note d'état au vêlage (1 à 5), primipares et multipares
PVmoyen	kg	Poids vif moyen adulte, primipares et multipares
PVnais	kg	Poids vif du veau à la naissance
ltype	coefficient	Coefficient lié à la race dans le calcul de la capacité d'ingestion
Variables de calcul intermédiaire		
SemL	semaine	Semaine de lactation
SemG	semaine	Semaine de gestation
IL	Indice	Indice de lactation
IG	Indice	Indice de gestation
IM	Indice	Indice de maturité
âge	mois	Age en mois de l'animal
QC _{1-12sem} / QC _{13-44sem}	kg	Quantité de concentrés à distribuer sur la période 1-12 ou 13 à 44 semaine de lactation
C _{Qc}	coefficient	Coefficient de concentrés à distribuer par kilo de lait potentiel
PV _{obj}	kg	Poids vif objectif à atteindre à un âge donné
âge _{PVobj}	semaine	Age donné associé à un poids objectif à atteindre
GMO _{Sref1→Sref2}	g.j ⁻¹	Gain moyen quotidien associé à une période afin d'atteindre PV _{obj}
Variables de sortie du modèle		
PLpot _{Max}	kg.VLL ⁻¹	Production laitière potentielle au pic de lactation
PLpot	kg.VLL ⁻¹ .j ⁻¹	Production laitière potentielle du jour (par catégorie)
C _{Besoins}	UFL	Composante du calcul des besoins de l'animal (par catégorie)
C _{Cl}	UEL	Composante du calcul de la capacité d'ingestion de l'animal (par catégorie)
Eff	Nb d'individu	Effectif au sein des catégories et/ou des lots
SemLact	semaine	Semaine moyenne de lactation des 2 catégories « début de lactation »
Qc	kg.VLL ⁻¹ .j ⁻¹	Quantité de concentrés à distribuer par animal (par catégorie)
BesoinsCroiss	UFL	Besoins des génisses
BesoinsGest	UFL	Besoins liés à la gestation des génisses
Cl (génisses)	UEB	Capacité d'ingestion des génisses

5.2.3.2 Pour le lot des vaches laitières en lactation et taries

Le modèle de démographie permet de connaître **les effectifs et le stade physiologique de chaque animal** (semaine de lactation, semaine de gestation, âge) au sein des catégories du lot en lactation. Il permet également de générer des données nécessaires au modèle d'ingestion et de production laitière comme la production laitière potentielle (PLpot) ou certaines composantes du calcul des besoins des animaux et de leur capacité d'ingestion. Ces composantes dépendent directement des paramètres démographiques définis dans le modèle démographique.

Une fois la matrice de démographie paramétrée, tous les individus sont identifiés, leurs stades physiologiques et les calculs préparatoires connus et fixes.

5.2.3.2.1 Production laitière potentielle

La production laitière potentielle est ici définie comme l'expression optimale du potentiel génétique déterminé par le projet téléonomique de la vache en lactation (Martin et Sauvant, 2010b, Puillet *et al.*, 2010) selon une ration équilibrée. La trajectoire de référence, à savoir la courbe de PLpot au cours de la lactation, est déterminée à partir de la production potentielle au pic de lactation et du stade de lactation et de gestation selon le modèle développé par Faverdin *et al.*(2011) inspiré du modèle proposé de Wilmink (1987).

Le premier paramètre à estimer est la production laitière potentielle au pic de lactation (PLpot_{max}, en kg.j⁻¹) en connaissant le potentiel laitier génétique des animaux (PLpot_{total}, en kg.an⁻¹) et en fonction de la parité. Une régression a été effectuée à partir de données INRA (Faverdin *et al.*, 2007b):

$$PLpot_{max} = a \times PLpot_{total} + b \quad (1)$$

Avec, pour les primipares : a=0.0038 et b=0.9643 et pour les multipares : a=0.0045 et b=0.2857

La production laitière potentielle du jour (PLpot_j, en kg.j⁻¹) est calculée selon le modèle développé par Faverdin *et al.*,(2007b).

- Pour les multipares :

$$PL_{pot_j} = PL_{MaxPot} \times \left\{ 1,047 - (0,69 \times e^{-0,90 \times SemL_j}) - (0,0127 \times SemL_j) - (0,50 \times e^{-0,12 \times (45 - SemG_j)}) \right\} \quad (2.1)$$

- Pour les primipares :

$$PL_{pot_j} = PL_{MaxPot} \times \left\{ 1,084 - (0,7 \times e^{-0,46 \times SemL_j}) - (0,009 \times SemL_j) - (0,69 \times e^{-0,16 \times (45 - SemG_j)}) \right\} \quad (2.2)$$

SemL, SemG représentent les semaines de lactation et de gestation des individus.

5.2.3.2.2 Calculs partiels de capacité d'ingestion et des besoins

Le modèle de démographie apprécie également les composantes des calculs de besoins (C_{Besoins}) et de capacité d'ingestion (C_{CI}) dépendant des stades physiologiques des vaches en lactation (semaine de lactation, gestation et âge de l'individu). Ces calculs dépendent aussi du paramétrage du troupeau laitier (PV_{nais}). Ces équations sont issues du modèle développé par l'Inra (Faverdin *et al.*, 2011).

$$C_{\text{Besoins}_j} = 0,00072 \times PV_{\text{nais}} \times e^{0,116 \times \text{Sem}G_j} \quad (3)$$

$$C_{\text{CI}_j} = IL_j \times IG_j \times IM_j \quad (4)$$

Avec :

$$IL_j = a + (1 - a) \times (1 - e^{-0,16 \times \text{Sem}L_j})$$

avec $a=0,6$ pour les primipares et $a=0,7$ pour les multipares

$$IG_j = 0,8 + 0,2 \times (1 - e^{-0,25 \times (40 - \text{Sem}G_j)})$$

$$IM_j = -0,1 + 1,1 \times (1 - e^{-0,08 \times \text{âge}_j}) \quad \text{et } IM=1 \text{ quand l'âge est supérieur à 40 mois}$$

5.2.3.2.3 Calcul de la quantité d'aliments concentrés à distribuer

La modulation de l'apport du concentré est un levier particulièrement important à prendre en compte dans la recherche du compromis entre performances animales et valorisation des ressources, notamment au pâturage. L'apport d'aliments concentrés au pâturage permet d'améliorer les quantités de lait produites (proche d'1kg de lait par kg MS de concentrés ingérés selon la synthèse bibliographique de Delaby *et al.*, (2003)). Mais, en parallèle, elle réduit les quantités d'herbe ingérées (Delagarde *et al.*, 2001, Delaby *et al.*, 2003), et donc, diminue la valorisation de l'offre herbagère au pâturage.

Bien souvent, le cahier des charges définit et exprime la quantité maximale d'aliments concentrés autorisée selon une quantité par animal et par an. L'enjeu ici est de traduire cette contrainte annuelle, paramétrée en entrée du modèle ($Q_{\text{C}_{\text{annuel}}}$, en $\text{kg.VL}^{-1}.\text{an}^{-1}$) en une quantité journalière à distribuer par individu (Q_{c} , en $\text{kg.VL}^{-1}.\text{j}^{-1}$). Nous avons fait le choix de calculer cette quantité **selon la production laitière potentielle et de moduler cette quantité selon le stade de lactation** (selon les catégories du début de lactation et 2^{ème} partie de lactation). Ainsi, plus les vaches produisent du lait et sont en début de lactation, plus elles reçoivent des aliments concentrés.

Ainsi, la quantité totale annuelle ($Q_{\text{C}_{\text{annuel}}}$) est répartie sur le début de lactation ($Q_{\text{C}_{1-12\text{sem}}}$) et la 2^{ème} partie de lactation ($Q_{\text{C}_{13-44\text{sem}}}$) (en kg MS de concentrés) selon un coefficient de répartition (C_{rep}):

$$Q_{\text{C}_{1-12\text{sem}}} = C_{\text{rep}} \times Q_{\text{C}_{\text{annuel}}} \quad (5.1)$$

$$Q_{\text{C}_{13-44\text{sem}}} = (1 - C_{\text{rep}}) \times Q_{\text{C}_{\text{annuel}}} \quad (5.2)$$

La quantité de concentrés à distribuer sur la période, 1 à 12 semaines ou 13 à 44 semaines, est ensuite répartie selon un coefficient de concentrés par kilo de lait potentiel (C_{Qc} , en $g.kg^{-1}$) sur la période voulue :

$$C_{Qc_{1-12sem}} = C_{Qc_{1-12sem}} / \left(\frac{\sum_1^{12} (PL_{pot} \times 7)}{effectif_{1-12sem}} \right) \quad (6)$$

On peut ensuite déduire de la quantité à distribuer chaque jour aux animaux de chaque catégorie (Qc_j , en kg MS) :

$$Qc_j = C_{Qc_j} \times PL_{pot_j} \quad (7)$$

5.2.3.2.4 Cas des vaches tarées

Dans ce modèle, les vaches tarées sont considérées identiques aux vaches laitières, à l'exception faite de la lactation. En effet, les vaches tarées présentes sont des vaches en préparation au vêlage, le modèle ne prenant pas en compte les vaches de réforme à l'engraissement. Les équations de calcul des besoins et de capacité d'ingestion sont donc identiques à celles des vaches en lactation ($IL=1$ pour les vaches tarées dans le calcul du coefficient de capacité d'ingestion).

Par choix de modélisation, les vaches tarées sont nourries selon leurs besoins et ne reçoivent pas d'aliments concentrés.

5.2.3.3 Pour les génisses

Du fait de la structure reproductible du modèle de démographie et de la définition de certains paramètres d'entrée, comme l'âge au premier vêlage et la note d'état au vêlage, la croissance des génisses doit se dérouler de façon totalement prédéterminée. Ainsi, contrairement aux vaches laitières, les génisses sont alimentées, non pas selon l'offre mais selon leurs besoins. Le modèle de démographie définit de ce fait la trajectoire de croissance des animaux en décrivant les poids objectifs à atteindre à certaines dates-clés et les gains moyens quotidiens (GMQ) associés. Ces dernières données ont été calculées selon les ordres de grandeurs et recommandations signalées dans la bibliographie (Trocon, 1994, Agabriel et Meschy, 2007, Le Cozler *et al.*, 2008, Le Cozler *et al.*, 2009). Le Tableau 2 présente les poids objectifs des génisses selon deux courbes de croissance créées selon l'âge au premier vêlage : 2 ou 3 ans.

Tableau 2 : définition du calcul des poids objectifs des génisses

Age		Poids objectif	
Age (en mois)	Age (en semaine)	Premier vêlage à 2 ans	Premier vêlage à 2ans
1,5	7	2 x poids de naissance	2 x poids de naissance
6	27	0,3 x poids adulte	0,3 x poids adulte
12	53	0,5 x poids adulte	-
15	65	-	0,5 x poids adulte
24	105	0,8 x poids adulte	0,7 x poids adulte
36	157	-	poids adulte

A partir de ces poids objectifs, les gains moyens quotidiens (GMQ, en g.j⁻¹) associés aux tranches d'âge peuvent être calculés selon l'équation :

$$GMQ_{1 \rightarrow 2} = \frac{(PV_{obj2} - PV_{obj1})}{(\hat{age}_{PV_{obj2}} - \hat{age}_{PV_{obj1}}) \times 7} \times 1000 \quad (8)$$

Le poids vif de chaque animal peut être ensuite calculé pour chaque semaine selon la relation :

$$PV_{Sx} = PV_{obj_{Sref1}} + \frac{(GMQ_{Sref1 \rightarrow Sref2} \times (Sx - Sref1) \times 7)}{1000} \quad (9)$$

Avec Sx , une semaine x de calcul, appartenant à la tranche des semaines de références $Sref1$ et $Sref2$ ($Sx \in [Sref1 - Sref2]$)

PV_{Sx} , poids vif de l'animal en semaine x

$PV_{obj_{Sref1}}$, poids vif objectif de référence de la semaine $Sref1$

$GMQ_{Sref1 \rightarrow Sref2}$, GMQ de la tranche $[Sref1 - Sref2]$

En connaissant le GMQ et le poids vif d'un animal à un temps donné, les besoins théoriques (*BesoinsCrois*, exprimés en UFL) dus à la croissance peuvent être estimés selon les équations développées par Jouven *et al.*, (2008) dans le modèle Sebien :

$$BesoinsCrois_{Sx} = \alpha \times GMQ_{Sref1 \rightarrow Sref2}^{1,4} \times PV_{Sx}^{0,75} \quad (10.1)$$

Avec $\alpha = 0,0435$ pour les génisses de 0 à 1 an et $\alpha = 0,045$ pour celles entre 1 et 3 ans.

Ces besoins sont majorés lors de la gestation en reprenant l'équation développée pour les vaches laitières par Faverdin *et al.*, (2007b):

$$BesoinsGest = 0,00072 \times PV_{nais} \times e^{0,116 \times SemG} \quad (10.2)$$

La capacité d'ingestion des génisses dépend du poids vif de l'animal et d'un coefficient lié à la race, I_{type} (dans ce cas-là, toute race laitière confondue) (Agabriel et Meschy, 2007). La capacité d'ingestion des génisses en croissance est exprimée en unités d'encombrement bovin (UEB).

$$CI = I_{type} \times PV^{0,9} \quad (11)$$

Compte-tenu du développement rapide du rumen des jeunes génisses laitières, il faut majorer cette capacité d'ingestion de 0.2 UEB pour des animaux dont le poids est inférieur à 150kg et ensuite, de 0.1 UEB jusqu'à un poids vif de 290kg (Agabriel et Meschy, 2007).

5.3 Définition de « l'animal pilote »

Le sous-modèle démographique permet de définir la structure démographique du lot en lactation, de connaître le stade physiologique (semaine de lactation, gestation et âge), ainsi que certaines variables dépendant de la distribution des vêlages comme la

PLpot pour chaque animal. En d'autres termes, le modèle de démographie est un modèle individu-centré. Néanmoins, le modèle d'ingestion et de production fonctionne à l'échelle du lot. Ces données individuelles doivent donc être agrégées à l'échelle du lot et de la catégorie à laquelle l'individu appartient. En d'autres termes, l'objectif, ici, est de pouvoir conserver les informations dépendantes d'une distribution que l'on veut étudier, tout en gardant une approche au niveau du lot.

Pour cela, le concept de « *l'animal pilote* » a été créé. A chaque pas de temps, cet individu est représentatif de l'ensemble des animaux composant le lot en effectuant la moyenne pondérée d'une variable donnée calculée pour chaque animal selon son stade physiologique. De la sorte, l'animal pilote nous permet de conserver les informations dépendant de la distribution des vêlages au cours de la saison sans pour autant devoir développer un modèle individu-centré de la gestion de l'alimentation du troupeau, plus compliqué à gérer (cf. partie 5.2.1.1).

Utiliser le concept de l'animal représentatif ou animal pilote plutôt que l'animal moyen permet de se rapprocher des pratiques de conduite d'alimentation des animaux en lots exercées par les éleveurs. En effet, un des moyens pour analyser les pratiques d'alimentation est d'identifier, pour chaque lot, un « animal pilote » permettant d'estimer les besoins alimentaires des animaux du lot, concept proposé par Guerin *et al.*,(1994), repris par Moulin *et al.*,(2001, 2002) et Puillet (2010). Cet animal pilote est défini comme une référence animale permettant à l'exploitant de prendre des décisions (Moulin, 2002) et d'apprécier la ration à distribuer (Puillet, 2010). L'éleveur se réfère à un animal réel, comme par exemple une vache ayant vêlé au pic de mise-bas, mais ne se rapporte jamais à un animal « chimère » (Moulin, 2002), comme l'est le concept d'individu moyen.

Pour illustrer le fonctionnement de l'animal pilote, le calcul permettant d'estimer la production laitière potentielle du lot est présenté, pour un jour j donné :

$$PL_{pot_j} = \frac{PL_{MaxPot} \times \sum_1^n \{1,047 - (0,69 \times e^{-0,90 \times SemL_i}) - (0,0127 \times SemL_i) - (0,50 \times e^{-0,12 \times (45 - SemG_i)})\}}{\sum_1^n X_i}$$

Avec X1, ..., Xn animaux dans le lot présent au jour j

SemL_i et SemG_i respectivement la semaine de lactation et la semaine de gestation de l'animal X_i

A *contrario*, la production laitière potentielle aurait été estimée par un individu moyen de la sorte :

$$PL_{pot_s} = PL_{MaxPot} \times \left\{ 1,047 - (0,69 \times e^{-0,90 \times SemL_{moy_s}}) - (0,0127 \times SemL_{moy_s}) - (0,50 \times e^{-0,12 \times (45 - SemG_{moy_s})}) \right\}$$

Avec $SemL_{moy_s}$ et $SemG_{moy_s}$ la semaine moyenne de lactation et de gestation de l'ensemble des animaux constituant le lot.

Pour illustrer les différences entre les calculs faits à partir des concepts de l'animal pilote ou de l'animal moyen, nous avons effectué deux simulations sur un même troupeau (100 vaches laitières dont 28 primipares) dont les paramètres zootechniques sont identiques (cf. Figure 4). Lors de la première simulation, la distribution des vêlages suit une courbe de Gauss, étalée sur 26 semaines, soit 6 mois. La répartition des vêlages de la seconde simulation est groupée sur 8 semaines avec 2 pics de vêlages. La Figure 4 présente le calcul de la production laitière potentiel.

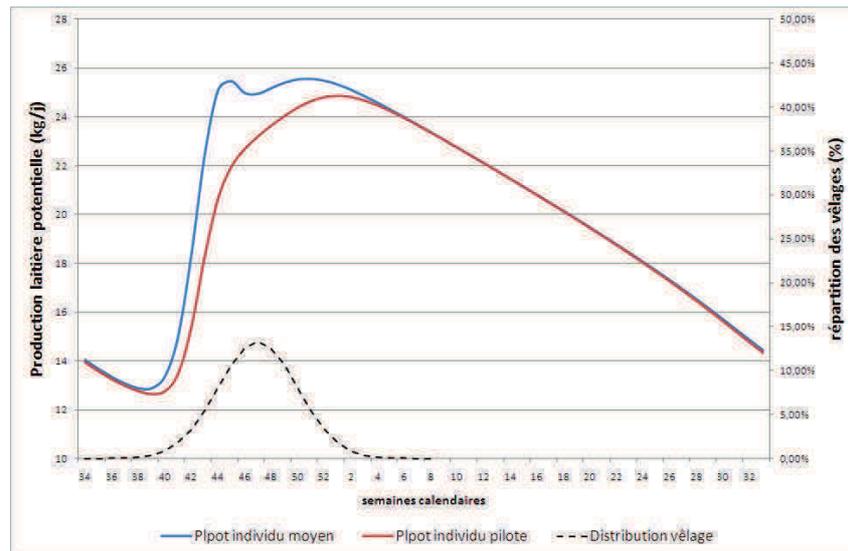


Figure 4 : Calcul de la production laitière potentielle (PLpot) selon le mode de calcul « individu pilote » et « individu moyen » sur une distribution de type loi normale (simulation 1)

Sur la Figure 5 et la Figure 6, les résultats des deux modes de calcul ne diffèrent que lors de la période des vêlages (jusqu'à 4,5 kg de lait par jour, Figure 5). Une fois tous les animaux vêtés, les deux courbes sont confondues.

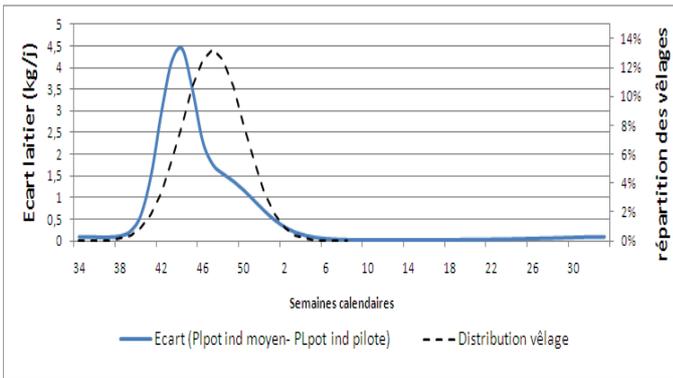


Figure 5: Ecart entre la production laitière de l'individu moyen et l'animal pilote (simulation 1)

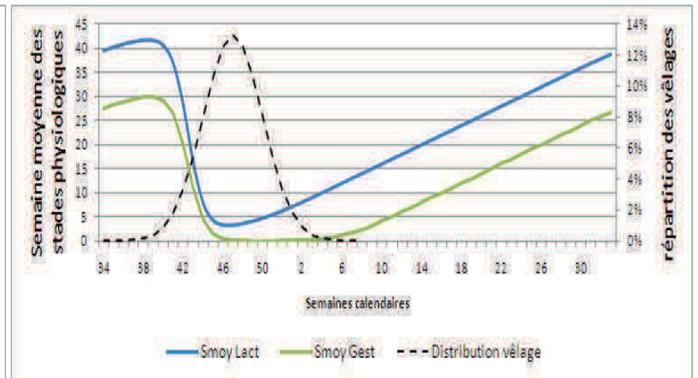


Figure 6 : Evolution du stade de lactation et de gestation de l'individu moyen au cours de la campagne (Simulation 1)

Une représentation du lot par l'individu moyen surestime la production laitière potentielle tant que tous les vêlages ne sont pas effectués. En effet, le calcul de la PLpot est basé sur la moyenne des stades de lactation et de gestation des animaux (cf Figure 6). Lors de la période des vêlages, certains animaux débutent leur lactation alors que d'autres sont toujours en fin de lactation du cycle de lactation précédent. La moyenne des semaines de lactation est alors « déplacée » par les animaux en fin de lactation, surévaluant ainsi la production laitière potentielle, phénomène également présent lors de la simulation 2 (Figure 7).

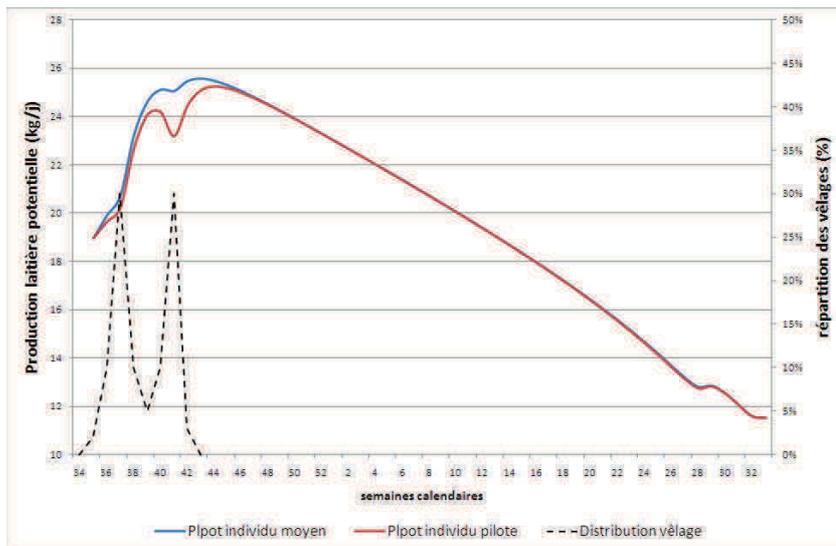


Figure 7 : Calcul de la production laitière potentielle (PLpot) du lot selon le mode de calcul «individu pilote » et « individu moyen » sur une distribution de type groupée avec 2 pics (simulation 2)

En outre, utiliser le concept de l'animal pilote permet d'être plus sensible aux variations de la distribution des vêlages. Ainsi, lors de la simulation 2 (Figure 7), la répartition des vêlages comporte 2 pics de vêlages que nous retrouvons de façon plus marquée sur la courbe de PLpot de l'individu représentatif.

Il existe ainsi autant d'animaux-pilotes que de lots ou de catégories pour le lot des vaches en lactation (Figure 8).

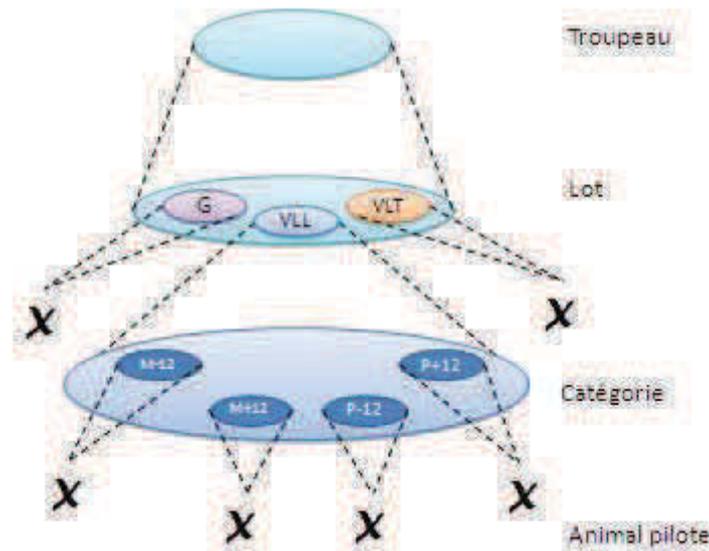


Figure 8: découpage du troupeau laitier en lots, représentés par l'animal pilote (X)

5.4 Composition de la ration ingérée

A l'âge, la ration est élaborée à partir des quantités de concentrés définies dans le modèle de démographie et d'un mélange de fourrages récoltés sur les parcelles de l'exploitation dans le modèle global (Feed characteristics dans la Figure 1). La gestion de l'allocation des fourrages récoltés aux différents lots est expliquée dans le chapitre 6. La ration des vaches laitières en lactation est composée des apports de concentrés définis dans le modèle de démographie et d'un mélange de foin de bonne qualité et de regain, appelé « ration de base », décrite par sa valeur énergétique, **UFLf**, et d'encombrement, **UELf**, valeurs définies à partir de la digestibilité des fourrages par le système INRA (Baumont *et al.*, 2007). Le lot des vaches laitières taries est alimenté uniquement sur la base d'un mélange de foin de moins bonne qualité et de regains, sans apports de concentrés. Le reste du foin de moins bonne qualité est alloué aux génisses

Lors de la période d'alimentation au pâturage, la ration est définie de la même manière selon les valeurs énergétiques **UFLh** et d'encombrement **UELh** de l'herbe. **UFLh** et **UELh** dépendent des caractéristiques du couvert végétal et de la composition botanique présentées dans le chapitre 5, mais aussi de l'interaction avec les animaux.

5.5 Module dynamique d'ingestion, production laitière et mobilisation des réserves corporelles des animaux

5.5.1 Principes

5.5.1.1 Cas des vaches laitières

En se focalisant sur l'adéquation entre la dynamique des besoins alimentaires des vaches en lactation et la dynamique de l'offre alimentaire, on va ainsi tester la sensibilité de la production laitière par rapport aux variations des apports alimentaires. Cette déviation entre la performance réalisée et la production attendue a été symbolisée par l'équation $P = P^* + \delta P$ (Martin et Sauvant, 2010b et 2010a) avec P, la production laitière observée, résultante de la variation des apports énergétiques, δP , par rapport à un besoin déterminé par une production laitière potentielle, P^* , définie par le projet téléonomique.

La production laitière observée dépend également de l'état corporel des vaches mais aussi de leur potentiel laitier génétique, à travers notamment leur capacité à mobiliser leurs réserves corporelles. Le modèle d'ingestion et de production prend en compte les mécanismes de mobilisation des réserves corporelles au cours de la première partie de lactation. En effet, au cours des premières semaines *postpartum*, même si l'apport énergétique est suffisant en quantité et en qualité, la capacité d'ingestion des animaux ne permet pas d'ingérer à la hauteur des besoins dus au fonctionnement des tissus et de la production laitière (Chilliard *et al.*, 1987, Reist *et al.*, 2002). Ce déficit énergétique est en partie comblé par la mobilisation des réserves corporelles déclenchée par une régulation homéorhétic permettant d'accentuer la partition de l'énergie vers la mamelle et d'augmenter la production laitière (Coulon et Remond, 1991, Friggens et Newbold, 2007, Gross *et al.*, 2011).

En deuxième partie de lactation, que nous avons fixée à partir de la 13^{ème} semaine, nous avons considéré que les animaux ne mobilisaient plus leurs réserves corporelles pour combler un éventuel déficit énergétique. Selon Coulon et Remond (1991) et Gross *et al.*, (2011), cette capacité à mobiliser des réserves corporelles diminue au fil des semaines de lactation, l'accentuation de la priorité métabolique vers la glande mammaire disparaît permettant de rétablir l'équilibre homéostatique. Un déficit énergétique peut arriver en cas de ration insuffisante ou de mauvaise qualité, ce qui peut être le cas au pâturage, l'animal s'adapte à court terme afin de maintenir son équilibre homéostatique. Cette adaptation se traduit par une perte de rendement laitier et une variation de l'état corporel (Coulon et Remond, 1991, Delaby *et al.*, 2009, Gross *et al.*, 2011).

Le modèle de production laitière en réponse à l'ingestion, l'état corporel et la capacité à mobiliser des réserves corporelles a été développé (Figure 1). La philosophie du modèle repose sur une série d'équations imbriquées décrivant les principaux mécanismes d'ingestion, de mobilisation et de reconstitution des réserves corporelles et de la production laitière. Il s'inspire largement du modèle développé par l'INRA (Faverdin *et al.*, 2007a, Faverdin *et al.*, 2007b). Seules l'énergie et l'encombrement sont pris en compte dans le modèle. Nous posons l'hypothèse que les aliments de la ration sont équilibrés en apports d'éléments azotés (équilibre PDI/UFL) et minéraux (Faverdin *et al.*, 2007b). Ce modèle est à la fois suffisamment développé pour représenter l'ensemble des mécanismes d'ingestion, de mobilisation et de production laitière, tout en restant simple.

Le modèle développé par l'Inra est basé sur les unités d'encombrement, sur la connaissance de la digestibilité des aliments de la ration et sur le principe que la capacité d'ingestion est saturée (Delagarde *et al.*, 2004, Tedeschi *et al.*, 2005). L'alimentation en stabulation est caractérisée par un apport alimentaire constant contrairement à la période de pâturage où la quantité ingérée dépend en outre de l'offre en biomasse et du couvert végétal fluctuant, d'un jour à l'autre. Ce phénomène est d'autant plus vrai que le pâturage est géré, dans ce modèle, selon les lois du pâturage tournant simplifié décrit par (Hoden *et al.*, 1991b, Delaby *et al.*, 2001). Les règles de gestion du pâturage sont détaillées dans le chapitre 6. Ce mode de gestion du pâturage induit pour les animaux de l'herbe en quantité et qualité au début du temps de séjour sur la parcelle, qui diminuent progressivement. Deux modèles dynamiques de lactation en réponse à l'ingestion ont été développés afin de modéliser les deux modes d'alimentation.

Les équations présentées ci-dessous sont appliquées à l'animal pilote, représentatif d'une des quatre catégories d'animaux présentées ci-dessus. Le pâturage est géré à l'échelle du lot d'animaux, composé des quatre catégories pour les vaches laitières en lactation. Les quatre catégories sont présentes en même temps sur la parcelle. Les équations sont appliquées sur l'animal pilote de chaque catégorie et ensuite agrégée à l'échelle du lot afin de calculer les interactions avec le modèle végétal (prélèvement de la biomasse).

5.5.1.2 *Cas des autres lots*

Contrairement aux vaches en lactation, les autres lots sont alimentés de façon à couvrir leurs besoins, de maintenance d'un état corporel pour les vaches tarées, et de croissance pour atteindre la note d'état et le poids voulu au vêlage pour les génisses. Les besoins sont alors l'élément moteur du modèle d'ingestion et de production.

5.5.2 Variables du modèle dynamique d'ingestion et de production laitière

Tableau 3: Présentation des variables du modèle d'ingestion et de production laitière

Nom	Unité	Description
Variables liées à l'ingestion (modèle générique et stabulation)		
Q_{ing}	kg MS	Quantité de matière sèche ingérée
CI	UEL	Capacité d'ingestion
UFL_{ing}	UFL	Energie ingérée
S_g		Taux de substitution marginal entre fourrages et concentrés
S_{ge}		Taux de substitution global entre fourrages et concentrés d'une ration équilibrée
E	UFL	Correction des interactions digestives entre fourrages ou herbe pâturée et concentrés
Variables liées à l'ingestion (pâturage)		
$Q_{h_{sc}}$	kg MS	Quantité d'herbe ingérée sans concentrés
Q_{h_c}	kg MS	Quantité d'herbe ingérée avec concentrés
$C_{dispo\ herbe}$	Coefficient	Coefficient de disponibilité de l'herbe
$C_{frein\ ing}$	Coefficient	Coefficient de limitation d'ingestion de l'herbe
H_j	cm	Hauteur d'herbe du jour
H_E	cm	Hauteur d'herbe à l'entrée d'une parcelle
H_{smin}	cm	Hauteur d'herbe sous laquelle les animaux ne pâturent plus
dmo_{ing}		Digestibilité de l'herbe ingérée
$S_{g_{hc}}$		Taux de substitution entre herbe ingérée et concentrés
DE_h		Densité énergétique de l'herbe pâturée
Variables liées au calcul des besoins		
$Besoins_{HP}$	UFL	Besoins hors production laitière
lact	Indice	Indice d'activité
Variables liées à la production laitière (modèle générique et stabulation)		
PLperm	$kg.VLL^{-1}.j^{-1}$	Production laitière permise par la ration
Ecart _{PL}	$kg.VLL^{-1}.j^{-1}$	Ecart entre PLperm et PLpot
PLprod	$kg.VLL^{-1}.j^{-1}$	Production laitière prédite par le modèle
UFL_{bilan}	UFL	Bilan énergétique
PertEta _{max}	Point de NEC	Perte d'état maximal au moment du vêlage
PertEtat	Point de NEC	Perte d'état possible au jour
Cmob	coefficient	Coefficient de mobilisation des réserves corporelles
ΔNEC	Point de NEC	Variation de la note d'état en fonction du bilan énergétique
ΔPV	kg	Variation du poids vif en fonction du bilan énergétique
Variables liée à la production laitière (pâturage)		
Ccorr	coefficient	Coefficient correcteur au pâturage (mobilisation à court terme)
PLmax	$kg.VLL^{-1}.j^{-1}$	Production laitière maximale atteinte sur une parcelle
PLcorr	$kg.VLL^{-1}.j^{-1}$	Production laitière corrigée en tenant compte de Ccorr

5.5.3 Modèle dynamique d'ingestion et de production laitière, cas des vaches laitières

Comme nous l'avons vu précédemment, une série d'étapes et d'équations imbriquées permettent de décrire les processus d'ingestion, de mobilisation et de variation des réserves corporelles et de production laitière (Delagarde et O'Donovan, 2005). Ces étapes sont présentées ci-dessous.

5.5.3.1 Ingestion de biomasse

5.5.3.1.1 En stabulation

Le principe fondamental pour calculer les quantités ingérées (**Qing**) est la saturation de la capacité d'ingestion des animaux (**CI**) :

$$Q_{ing_j} = \frac{\{CI_j - (S_{g_j} \times Q_{c_j} \times UEL_f)\}}{UEL_f} \quad \text{Faverdin et al., (2007b) (12)}$$

Le calcul de la capacité d'ingestion dépend du poids vif, de la note d'état des vaches qui varient selon le bilan énergétique de la veille, de la production laitière potentielle du jour (**PLpot**) et du coefficient de correction selon les stades physiologiques des animaux de la catégorie (**C_{CI}**). Ces deux derniers éléments sont issus du modèle démographique.

$$CI_j = \{13,9 + (0,015 \times (PV_{j-1} - 600)) + (0,15 \times PL_{pot_j}) + (1,5 \times (3 - NEC_{j-1}))\} \times C_{CI_j} \quad \text{(Faverdin et al., 2007a) (13)}$$

S_g est le taux de substitution marginal entre fourrages et concentrés dépendant du taux de substitution global d'une ration à l'équilibre pour satisfaire un objectif de production précis (**S_{ge}**) (Faverdin et al., 2011) :

$$S_{g_j} = -0,43 + (1,82 \times S_{ge_j}) + (0,035 \times Q_{c_j}) - (0,00053 \times PL_{pot_j} \times Q_{c_j}) \quad (12.1)$$

$$S_{ge_j} = d \times PL_{pot_j}^{-0,62} \times e^{1,32 \times (UFL_f / UEL_f)} \quad (12.2)$$

(Faverdin et al., 2007b)

Avec $d = 0,96$ pour les primipares

$d = 1,1$ pour les multipares

5.5.3.1.2 Au pâturage

Le modèle d'ingestion a été modifié au pâturage afin de tenir compte de l'effet de la structure du couvert végétal et du management du pâturage sur la motivation des animaux à ingérer l'herbe (Delagarde *et al.*, 2011a) sur des facteurs décrits ci-dessus.

Ainsi, au cours du séjour du lot sur la parcelle, plus les animaux pâturent, plus il est difficile pour eux d'accéder à l'herbe disponible et de l'ingérer. Deux coefficients emboîtés permettent de modéliser ce phénomène : le coefficient de disponibilité de l'herbe et le coefficient de limitation d'ingestion ($C_{dispo\ herbe}$, $C_{frein\ ing}$). Ils dépendent de la hauteur d'herbe du jour (H_j), à l'entrée sur la parcelle (H_E) et de celle en dessous de laquelle les animaux ne peuvent plus pâturer (H_{min}) (Delaby *et al.*, 2001).

$$C_{dispo\ herbe_j} = \frac{(H_j - H_{S_{min}})}{(H_E - H_{S_{min}})} \quad (\text{Delaby } et\ al.,\ 2001) \quad (14)$$

$$C_{frein\ ing_j} = e^{(-8 \times C_{dispo\ herbe_j})} \quad (\text{Delaby } et\ al.,\ 2001) \quad (15)$$

Ce coefficient est alors intégré au calcul des quantités ingérées d'herbe par animal. Comme décrit dans le modèle développé par Delagarde *et al.*, (2011a) dans un premier temps, l'ingestion d'herbe est calculée sans tenir compte des quantités de concentrés distribuées (Qh_{sc}). La quantité réelle d'herbe ingérée (Qh_c) est ensuite recalculée en considérant la quantité de concentrés et les taux de substitution, diminuant ainsi la quantité d'herbe ingérée. La quantité d'herbe ingérée dépend alors de la capacité d'ingestion saturée de l'animal, des quantités de concentrés distribuées, des coefficients modélisant la disponibilité du couvert à être ingérée et de la valeur d'encombrement de l'herbe.

$$Qh_{sc_j} = \frac{(1 - C_{frein\ ing_j}) \times CI_j}{UEL_{h_j}} \quad (\text{Delaby } et\ al.,\ (2001)\ \text{et}\ \text{Delagarde } et\ al.,\ (2011a)) \quad (16)$$

La valeur d'encombrement de l'herbe ingérée (UEL_h) est calculée selon sa digestibilité (dmo_{ing}). La digestibilité évolue tous les jours selon la pousse de l'herbe et du prélèvement des animaux les jours précédents (Jouven *et al.*, 2006a).

$$UEL_{h_j} = \frac{140}{\left\{ 166,3 - 2379 \times dmo_{ing_j} + 270 \times dmo_{ing_j}^2 \right\}} \quad (17.1)$$

La digestibilité du couvert végétal permet également de calculer les valeurs énergétiques quotidiennes de l'herbe ingérée selon l'équation (Jouven *et al.*, 2006a) :

$$UFL_{h_j} = 1,576 \times dmo_{ing_j} - 0,257 \quad (17.2)$$

La quantité d'herbe ingérée (Qh_c), en tenant compte des apports d'aliments concentrés, est ensuite calculée en considérant un taux de substitution (Faverdin *et al.*, 2007b, Delagarde *et al.*, 2011a). Plus la quantité de concentrés apportée est importante, plus le taux de substitution est élevé et limite l'ingestion d'herbe. Ce taux de substitution dépend des valeurs nutritionnelles de l'herbe ingérée ($UFLh$) mais aussi de la production laitière potentielle des animaux et du taux de couverture de leurs besoins théoriques (Faverdin *et al.*, 2007b, Delagarde *et al.*, 2011a) :

$$Qh_{c_j} = Qh_{sc_j} - Sg_{hc_j} \times Q_{c_j} \quad (18)$$

$$\text{Avec } Sg_{hc_j} = \min(Sg_{hc_1}, Sg_{hc_2})_j \quad (19.1)$$

$$Sg_{hc_1_j} = 0,8 + (0,01 \times Q_{c_j}) \quad (19.2)$$

$$Sg_{hc_2_j} = 0,11 + (0,02 \times Q_{c_j}) - (1,13 \times DEh_j^2) + A_j \times \left(\frac{Qh_{sc_j} \times UELh_j}{CI_j} \right) \quad (19.3)$$

$$DEh_j = \frac{UFLh_j}{UELh_j} \quad (19.4)$$

$$A_j = (0,0004 \times PL_{pot_j}^2) + (2,39 \times DEh_j^2) - (0,0452 \times PL_{pot_j} \times DEh_j) \quad (19.5)$$

5.5.3.1.3 Energie ingérée

En connaissant les quantités de biomasse ingérée (fourrages ou herbe pâturée et aliments concentrés) et leur valeur énergétique, l'énergie ingérée (UFL_{ing}) est déduite selon l'équation développée par Faverdin *et al.*, (2007b) :

$$UFL_{ing} = UFL_f \times Q_{ing} + UFL_c \times Q_c - E \quad (20)$$

La valeur UFL du concentré (UFL_c) est un paramètre modifiable, fixé arbitrairement à 1, correspondant à un concentré théorique.

Dans ce calcul, les interactions digestives entre les fourrages ou l'herbe pâturée et le concentré sont prises en compte grâce à un terme correctif, appelé E (Faverdin *et al.*, 2007b) :

$$E = \left\{ (0,00063 \times (Q_c \times 100 / Q_{ing})^2) - (0,017 \times (UFL_f \times Q_{ing} + UFL_c \times Q_c)) + (0,002 \times (UFL_f \times Q_{ing} + UFL_c \times Q_c)^2) \right\} \quad (21)$$

5.5.3.2 Calculs des besoins

Les besoins nutritionnels d'une vache laitière en lactation sont déterminés à partir des dépenses relatives à l'entretien (croissance et renouvellement des tissus), à la

gestation et à la production laitière (Faverdin *et al.*, 2007b, Faverdin *et al.*, 2011). L'énergie ingérée par l'animal est ainsi répartie selon ces postes d'utilisation.

La sortie principale étant la production laitière réalisée en fonction de l'offre alimentaire, nous effectuons l'hypothèse que l'énergie ingérée est utilisée afin d'assurer les besoins de maintenance et de gestation et que l'énergie restante est valorisée sous forme de lait. Nous calculons ainsi les besoins « hors production laitière » (**Besoins_{HP}**) selon le modèle développé par (Faverdin *et al.*, 2011), afin d'estimer l'énergie disponible uniquement pour la production laitière.

$$Besoins_{HPj} = \left\{ (0,041 \times PV_{j-1}^{0,75}) \times Iact \right\} + C_{besoinsj} \quad (22)$$

$C_{besoins}$ est calculé par le modèle de démographie (éq. 3)

Le besoin d'entretien est dépendant du poids vif (calculé selon le poids vif de la veille). Il est majoré selon le degré d'activité de l'animal par le coefficient **lact** (Faverdin *et al.*, 2011). **lact** varie selon le type de stabulation (stabulation entravée : lact est neutre, stabulation libre : **lact** est de 1.1). Au pâturage, compte-tenu des déplacements importants des animaux (trajets intra-parcellaires et entre la salle de traite et la parcelle, la dépense énergétique allouée à la maintenance est majorée de 20% (**lact**=1.2). Cette revalorisation est une estimation moyenne arbitraire (Faverdin *et al.*, 2007b, Faverdin *et al.*, 2011) qui pourrait être revalorisée afin de mieux rendre compte d'un parcellaire éclaté ou difficile impactant sur les déplacements des animaux.

5.5.3.3 Calcul de la production laitière réalisée

Nous pouvons ainsi directement estimer la production laitière permise par l'énergie ingérée, compte tenu des besoins « hors production » des animaux que nous appelons « production laitière permise par la ration » (**PL_{perm}**). L'hypothèse sous-jacente est que l'énergie en surplus des besoins « hors production » est valorisée uniquement par la mamelle.

La valeur énergétique d'un kilo de lait est estimée à 0,44 UFL (Faverdin *et al.*, 2011) à partir d'une régression linéaire effectuée sur des données de Coulon et Rémond (1991).

$$PL_{permj} = \frac{(UFL_{ingj} - Besoins_{HPj})}{0,44} \quad (23)$$

Nous faisons l'hypothèse que la production laitière d'un jour est la résultante de l'énergie ingérée des deux jours précédents. En effet, certains travaux ont montré que lorsque la ration change brutalement de composition, en qualité et/ou en quantité, les animaux s'adaptent à cette perturbation, en modifiant quasiment immédiatement leur niveau d'ingestion (Moseley *et al.*, 1976, Faverdin *et al.*, 2007a). L'impact sur les rendements laitiers est, quant à lui, effectif avec un délai de quelques jours (Moseley *et al.*, 1976), délais induit par la capacité de tampon des réserves à court terme des animaux (Faverdin *et al.*, 2007a). Cette capacité tampon est différente de la mobilisation

en début de lactation déterminée par des processus homéorhétiques (Roche *et al.*, 2009). Pour modéliser ce phénomène, nous effectuons donc une moyenne mobile sur les deux derniers jours. Cette hypothèse nous permet de mieux simuler l'adaptation des animaux à la variation des apports nutritifs, notamment au pâturage et de mieux simuler les courbes de production laitière en système pâturage tournant simplifié tel que décrite par (Hoden *et al.*, 1991b).

$$PL_{perm_j} = 0,70 \times PL_{perm_{j-1}} + 0,3 \times PL_{perm_{j-2}} \quad (24)$$

Dorénavant, lorsque nous évoquons la production laitière permise par la ration, ce sera celle calculée selon la moyenne mobile.

5.5.3.3.1 En stabulation

Lorsque nous connaissons la production laitière permise par la ration, l'écart entre la production laitière permise par la ration et la production laitière potentielle est alors calculé (**Ecart_{PL}**) :

$$Ecart_{PL_j} = PL_{perm_j} - PL_{pot_j} \quad (25)$$

La production laitière réalisée dépend alors de l'état d'**Ecart_{PL}**, positif ou négatif, et du stade de lactation de la catégorie (début de lactation ou 2^{ème} partie de lactation). En effet, si l'écart est négatif, les apports d'énergie par la ration ne sont pas suffisants pour effectuer la production laitière attendue (**PL_{pot}**). Dans cette situation, deux cas se présentent : i) les animaux se situant dans la catégorie début de lactation, ces derniers peuvent mobiliser leurs réserves corporelles afin de combler une partie de cet écart selon leur potentiel de mobilisation prédéfini ; ii) les vaches se trouvant en 2^{ème} partie de lactation, lesquels ne peuvent alors plus mobiliser et effectuent seulement la production permise par la ration. Ces deux situations sont présentées ultérieurement.

Si cet écart est positif, les besoins théoriques, comprenant la production laitière potentielle, sont couverts. L'excédent d'énergie apportée par la ration est alors valorisé, sous forme de lait excédentaire en partie. En d'autres termes, le modèle permet de dépasser la production laitière potentielle déterminée selon le potentiel génétique pour une ration équilibrée.

$$PL_{prod_j} = PL_{perm_j} - (PL_{perm_j} - PL_{pot_j}) \times 0.75 \quad (26)$$

Le bilan énergétique (**UFL_{bilan}**) est calculé selon l'écart entre la production laitière permise par la ration et la production laitière réalisée.

$$UFL_{bilan_j} = UFL_{ing_j} - (Besoins_{HP_j} + PL_{prod_j} \times 0.44) \quad (27)$$

5.5.3.3.1.1 Mobilisation des réserves corporelles : cas du début de lactation

Au début de la lactation, les animaux mobilisent leurs réserves corporelles afin de combler le déficit entre la production laitière potentielle (**PL_{pot}**) et la production permise

par la ration ingérée (PL_{perm}) selon un pool d'énergie mobilisable prédéfini. Cette capacité à mobiliser de l'énergie est fonction de la quantité des réserves adipeuses au moment du vêlage et du niveau de production de l'animal (PL_{MaxPot}) (Faverdin *et al.*, 2007a). L'équation 28 permet ainsi de modéliser le pool d'énergie mobilisable en fonction de la note d'état au vêlage (NEC_{vel}) et du niveau de production potentiel de l'animal. Ce pool est exprimé en énergie, convertie en perte d'état maximale ($PertEta_{max}$) selon l'équation développée par Chilliard *et al.*, (1987) (équation 31.1):

$$PertEta_{max} = 2.20 + 0.047 \times PL_{MaxPot} - 0.51 \times NEC_{vel} + \Delta \quad (28)$$

Avec $\Delta = -0.1$ pour les primipares et $\Delta = 0.1$ pour les multipares

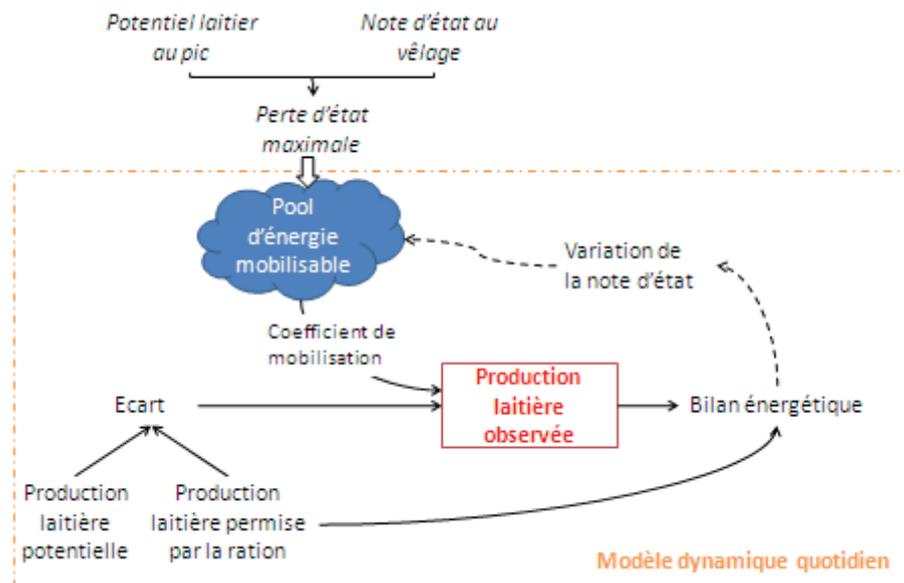


Figure 9 : schéma du fonctionnement du modèle de mobilisation des réserves corporelles en début de lactation

L'énergie mobilisable issue du pool permet de combler une partie de l'écart entre PL_{pot} et PL_{perm} selon l'énergie mobilisable restante et le stade de lactation. En effet, selon Coulon et Remond (1991), le pouvoir tampon des réserves corporelles s'amenuise au fil des semaines de lactation pour s'éteindre vers la 12^{ème} semaine (Faverdin *et al.*, 2007a, Buttchereit *et al.*, 2010). Ce pouvoir tampon est modélisé par le biais d'un coefficient (C_{mob}), fonction de la semaine moyenne pondérée de lactation des animaux présents dans la catégorie début de lactation ($SemLact$) :

$$C_{mob_j} = 0.7 \times (1.2 - 0.2 \times e^{-0.6 \times SemLact_j} - 0.04 \times SemLact_j) \quad (29)$$

$$PL_{prod_j} = PL_{perm_j} - (Ecart_{PL_j} \times C_{mob_j}) \quad (30)$$

Le bilan énergétique est ensuite calculé selon l'équation 27 considérant la variation de l'état corporelle incluant la mobilisation énergétique. Le calcul du bilan

énergétique permet également de décrémenter le pool d'énergie, selon les relations établies par Chilliard *et al.*, (1987) :

$$\Delta NEC_{-j} = UFL_{bilan,j} / 180 \quad (31.1)$$

$$PertEta_j = PertEta_{j-1} + \Delta NEC_{-j} \quad (32)$$

Lorsque le pool d'énergie mobilisable est épuisé, les animaux ne peuvent plus combler un déficit potentiel entre l'énergie ingérée et l'énergie nécessaire à la réalisation de PL_{pot} . La production réalisée correspond alors à la production permise par la ration.

$$PL_{obs} = PL_{perm} \quad (33)$$

5.5.3.3.1.2 Cas de la deuxième partie de lactation

Comme nous l'avons vu précédemment, lors de la deuxième partie de lactation, les vaches en lactation n'ont plus la possibilité de mobiliser des réserves corporelles en cas d'apports énergétiques insuffisants pour couvrir les besoins théoriques déterminés à partir de PL_{pot} . Les vaches ne produisent alors plus que la production laitière permise par la ration. *A contrario*, si PL_{perm} dépasse PL_{pot} , l'excédent énergétique est valorisé sous forme de lait et de reconstitution des réserves corporelles, comme expliqué dans la partie 5.5.3.3.

5.5.3.3.2 Au pâturage

En connaissant les quantités d'herbe ingérées (Qh_c , équation 18), l'énergie ingérée (UFL_{ing} , équation 20) et les besoins « hors production » ($Besoins_{HP}$, équation 22), nous déduisons la production laitière permise par la ration : PL_{perm} du jour, sur le même principe que le modèle en stabulation (équation 23). La moyenne mobile présentée par l'équation 24 est également effectuée.

Cette production laitière permise par la ration est corrigée selon un coefficient : C_{corr} . Ce coefficient permet de tenir compte des ajustements de l'animal à la fluctuation importante des apports nutritifs d'un jour à l'autre. Comme vu précédemment dans la partie 5.5.3.3, les travaux de Moseley *et al.*, (1976), Hernandez-Urdaneta *et al.*, (1976) et Faverdin *et al.*, (2007a) ont montré qu'en cas de changement brutal de la composition de la ration (en quantité et/ou en qualité), les animaux s'adaptent et l'impact sur la production laitière s'effectue progressivement avec un délai de quelques jours. En d'autres termes, le coefficient C_{corr} permet de simuler cette capacité adaptative à court terme de l'animal. C_{corr} permet ainsi de limiter la chute de production laitière lorsque l'énergie ingérée diminue fortement en fin de séjour sur la parcelle (Figure 10 - a). L'animal comble ainsi une partie de l'écart entre PL_{perm} et la production laitière réalisée maximale atteinte sur la parcelle (PL_{max}). PL_{max} représente de ce fait le potentiel laitier permis par l'offre herbagère de la parcelle. Au début du séjour sur la parcelle, PL_{max} n'a pas été atteint, puisque la production laitière du jour est la résultante de l'énergie ingérée sur les deux derniers jours de la parcelle précédente. A ce moment-là, si PL_{perm} est inférieur à PL_{pot} , le coefficient C_{corr} permet de combler une partie de cet

écart. Dans le modèle, **Ccorr** est paramétré à 0.50 pour les animaux en début de lactation pour prendre en compte la mobilisation des réserves corporelles et à 0.25 pour le reste de la lactation. Les valeurs de Ccorr ont été ajustées sur des données expérimentales de lots au pâturage (Delaby, communication personnelle).

$$PL_{Corr_j} = PL_{perm_j} + C_{corr} \times \{Max(PL_{pot_j}; PL_{max_j}) - PL_{perm_j}\} \quad (34)$$

Comme dans le cas présenté dans la Figure 10 - b, il arrive que la ration offerte au pâturage (incluant les apports de concentrés) permette de produire plus de lait que la production laitière potentielle (**PLcorr > PLpot**). Par exemple, ce cas de figure arrive fréquemment en période de pâturage au printemps, où les parcelles offrent une herbe de qualité en quantité. Dans ce cas-là, de manière similaire au modèle générique d'ingestion et de production, une correction est appliquée selon l'équation 26 autorisant un dépassement de la production laitière potentielle. La correction est alors appliquée à l'ensemble des jours restant sur la parcelle afin de respecter la courbe de lactation.

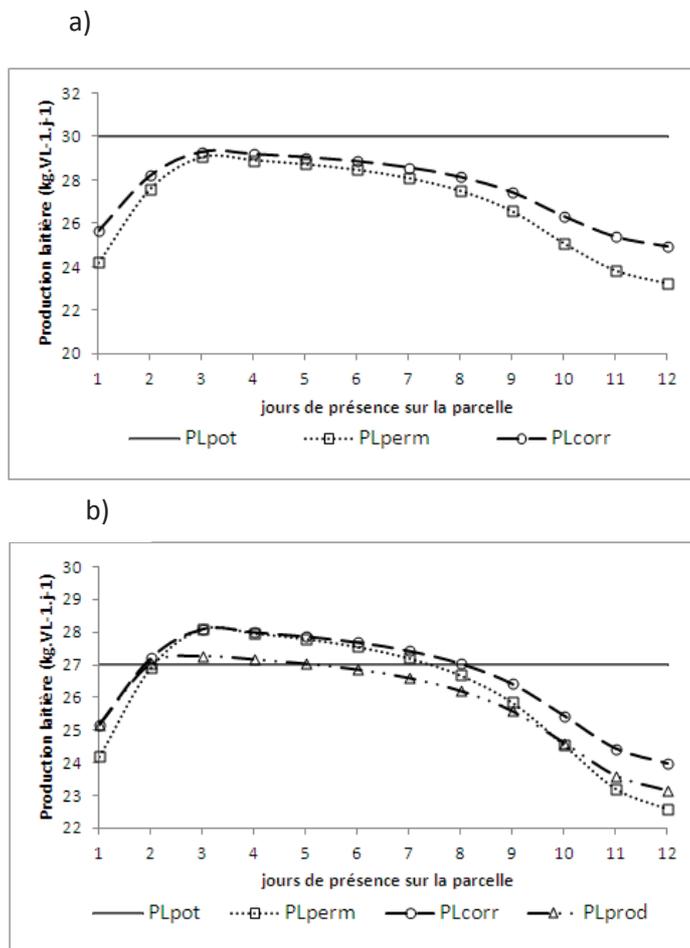


Figure 10 : rôle des coefficients correcteurs de la production laitière en système pâturage tournant simplifié

a) cas où la PLpot est supérieure au potentiel de production laitière de la parcelle (PLpot=30kg.VL-1)

b) cas où la PLpot est inférieure au potentiel de production laitière de la parcelle (PLpot=27kg.VL-1)

Le bilan énergétique est ensuite effectué selon la même équation présentée ci-dessus (équation 27).

5.5.3.4 Variation de l'état corporel et du poids vif

Chaque jour, le bilan énergétique (UFL_{bilan}) est effectué à partir de l'énergie ingérée, des besoins « hors production » et de la production réalisée incluant la production due à la mobilisation des réserves corporelles à long terme et à court terme. Ce bilan énergétique permet alors de calculer les variations d'état corporel (ΔNEC) et de poids vif (ΔPV) correspondants selon les relations établies par (Chilliard *et al.*, 1987).

Les variations d'état corporel ou de poids vif, positives et négatives, sont respectivement annotées par le signe + ou -.

$$\Delta NEC -_j = UFL_{bilan_j} / 180 \quad (31.1)$$

$$\Delta PV -_j = UFL_{bilan_j} / 3.5 \quad (31.2)$$

$$\Delta NEC +_j = UFL_{bilan_j} / 240 \quad (31.3)$$

$$\Delta PV +_j = UFL_{bilan_j} / 4.5 \quad (31.4)$$

5.5.4 Conservation des données d'une catégorie d'animal à l'autre : cas des variations de l'état corporel des animaux et de leur poids vif

De par la construction de notre troupeau laitier, les animaux des lots et des catégories sont indépendants entre eux. Le modèle de démographie ne permet pas de tenir compte des flux démographiques réels d'animaux passant de lot en lot. Par conséquent, il n'est pas possible de suivre chronologiquement un animal au cours de son cycle de lactation et de conserver ces attributs ou caractéristiques lors du passage d'une catégorie à une autre. Dès lors, ces caractéristiques, telles que la note d'état ou le poids vif doivent être initialisées à chaque changement de catégorie ou au moment du tarissement comme présenté dans la Figure 11.

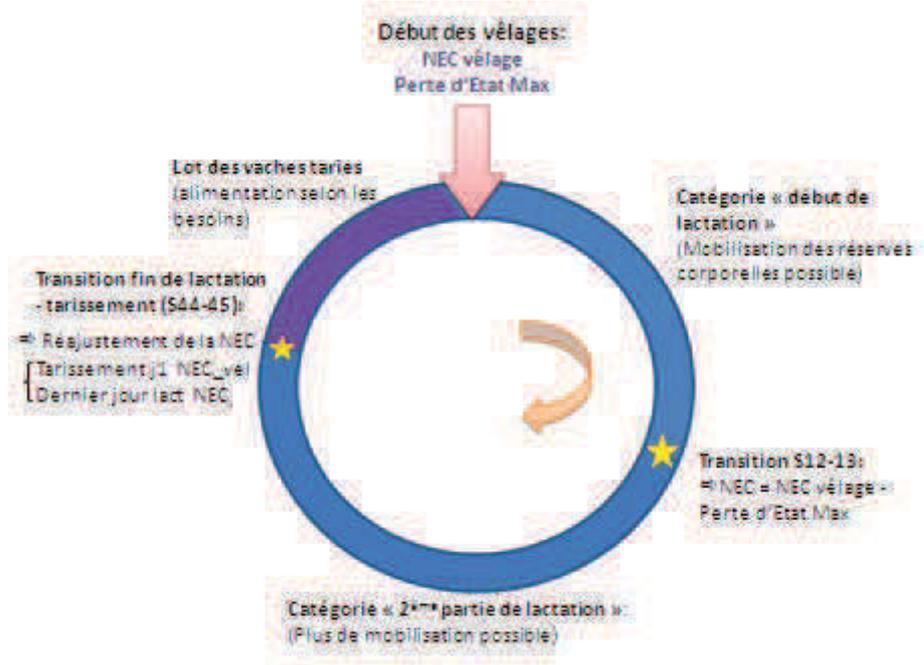


Figure 11 : schéma de l'initialisation de la note d'état et des transitions entre les périodes de lactation, d'une catégorie d'animal à une autre

Pour instaurer ces initialisations, plusieurs décisions ont été prises, décisions établies en accord avec d'autres choix précédemment faits, notamment sur les capacités de mobilisation des réserves corporelles à long et court terme des animaux. Ainsi, nous avons fait l'hypothèse que les animaux en début de lactation mobilisaient l'ensemble du pool d'énergie mobilisable ($PertEta_{max}$). En effet, comme expliqué précédemment, la mobilisation des réserves corporelles en début de lactation est déterminée génétiquement et le pilotage de l'alimentation n'influe quasiment pas sur la perte d'état corporel (Friggens et Newbold, 2007, Roche *et al.*, 2009), les animaux étant de façon quasi systématique en déficit énergétique au début de la lactation (Gross *et al.*, 2011). Ainsi, comme le montre l'étude de Coulon et Rémond (1991), l'action compensatrice des réserves corporelles diminue avec le temps, de par leur mobilisation progressive et des adaptations métaboliques des animaux permettant de rétablir l'équilibre homéostatique. De ce fait, pour réinitialiser la note d'état des individus lors de la transition entre la catégorie début de lactation et la deuxième partie de lactation, nous avons choisi de retrancher la perte d'état maximale à la note d'état au vêlage.

De la même manière, lors du tarissement des animaux, une réinitialisation des caractéristiques des animaux est nécessaire. Lors de la deuxième partie de lactation, la production laitière diminue progressivement (Gross *et al.*, 2011), permettant ainsi à l'animal de reconstituer ses réserves corporelles (Coulon et Rémond, 1991). Nous avons fait le choix que les animaux, au moment du tarissement, avaient atteint la note d'état au vêlage paramétrée (entrée du modèle). Le différentiel, positif ou négatif, entre la note du dernier jour de lactation et du premier jour de tarissement est converti en unité d'énergie (UFL) selon les équations 31.1 et 31.3 (Chilliard *et al.*, 1987).

Cette énergie excédentaire ou déficitaire est ensuite convertie en kilo d'aliments concentrés par individu à retrancher ou à apporter selon les ordres de grandeurs : une unité fourragère laitière équivalant à 0,44 litre de lait.

Ces réinitialisations s'effectuent de prime abord sur la note d'état et ensuite sur le poids vif. En effet, la note d'état est le moteur du modèle de mobilisation des réserves corporelles, le poids vif, variable plus secondaire, n'évolue que selon le bilan énergétique. Selon Coulon et Rémond (1991) citant les travaux de Garnsworthy (1988), la note d'état est un facteur influent et important de la production laitière face aux variations de l'apport énergétique.

5.5.5 Modèle dynamique d'ingestion et de production laitière, cas des autres lots

5.5.5.1 Lot des vaches laitières tarées

Comme présenté dans la partie 5.5.4, les vaches laitières en fin de lactation ont reconstitué leurs réserves corporelles et au moment du tarissement, elles ont atteint la note d'état au vêlage. Par conséquent, lors de la période où les vaches sont tarées, leur note d'état ne varie pas ainsi que leur poids vif. Elles sont donc alimentées uniquement de façon à satisfaire leur besoins.

Ces besoins sont quantifiés de la même manière que pour le lot des vaches en lactation, selon l'équation 22 avec l'indice d'activité changeant selon le type de stabulation ou la présence des vaches tarées au pâturage.

$$Besoins_{VLT_j} = \{(0.041 \times PV^{0.75}) \times Iact\} + C_{besoins_j} \quad (35)$$

Dès lors, les vaches tarées ingèrent seulement la quantité de biomasse suffisante pour couvrir leurs besoins, en stabulation (équation 36.1) comme au pâturage (équation 36.2). La ration des vaches tarées est également composée d'un mélange de fourrages, foin de moindre qualité et regains. La ration de base des vaches tarées est décrite par sa valeur UFL et UEL (**UFLf**, **UELf**). Au pâturage comme en stabulation, les vaches tarées ne reçoivent pas d'aliments concentrés.

$$Qing_j = Besoins_{VLT_j} / UFLf \quad (36.1)$$

$$Qing_j = Besoins_{VLT_j} / UFL_{h_j} \quad (36.2)$$

5.5.5.2 Lot des génisses

Dans la même philosophie que le rationnement des vaches tarées, du fait de la structure figée du modèle de démographie, les génisses doivent impérativement atteindre leur poids objectif à une date donnée comme expliqué dans la partie 5.2.3.3. Les génisses sont donc alimentées de façon à subvenir à leurs besoins, de croissance principalement. Contrairement aux vaches tarées, les génisses peuvent recevoir des apports d'aliments concentrés si nécessaire. En effet, selon Agabriel et Meschy,(2007), les génisses de moins de 1 an, ayant un objectif supérieur ou égal à 700 g.j⁻¹, alimentée

avec des fourrages de densité énergétique inférieur à 0.68, ont besoin d'un apport complémentaire d'aliments concentrés. Cet apport est également indispensable si les génisses de moins de 1 an pâturent des parcelles qui ne produisent pas une herbe d'excellente valeur nutritive (Agabriel et Meschy, 2007). *A contrario*, les génisses vêlant à 36 mois ont un GMQ restreint passé la première année afin de ne pas atteindre un état d'engraissement trop important, pénalisant le vêlage et la lactation future (Le Cozler *et al.*, 2009). Ces génisses n'ont pas besoin d'apports d'aliments concentrés et peuvent séjourner sur des parcelles de qualité moyenne (Le Cozler *et al.*, 2009, Garcia-Launay *et al.*, 2011).

Les besoins des différents lots de génisses (Gx) sont calculés à partir des données du modèle de démographie : **BesoinsCroiss** (équation 10.1) additionnés de **BesoinsGest** (équation 10.2) si les génisses sont gestantes :

$$Besoins_{Gx_j} = 0.041 \times Iact + BesoinsCroiss_j \quad \text{Jouven et al., (2008)} \quad (37)$$

5.5.5.2.1 Ingestion en stabulation

Les quantités ingérées sont de prime abord calculées pour considérer les apports de concentrés éventuels (**Qing_{sc}**) permettant d'estimer l'énergie ingérée (**UFL_{ing brut}**):

$$Qing_{sc_j} = \frac{CI_j}{UEL_f} \quad (38.1)$$

$$UFL_{ing\ brut_j} = Qing_{sc_j} \times UFL_f \quad (38.2)$$

Si cette énergie ingérée ne permet de pas couvrir les besoins déterminés par l'équation 37, alors un apport d'aliments concentrés est nécessaire. Une fois **Qc** estimé, la quantité de fourrage ingéré est calculée.

$$Q_{c_j} = \frac{(Besoins_{G_j} + E - CI_j \times DE_f)}{(UFL_c - Sg \times DE_f \times UEL_f)} \quad (38.3)$$

$$Q_{f_j} = \frac{(CI_j - Q_{c_j} - Sg \times UEL_f)}{UEL_f} \quad (38.4)$$

En connaissant Qc et Qf, l'énergie ingérée peut être calculée :

$$UFL_{ing_j} = Q_{f_j} \times UFL_{f_j} + Q_{c_j} \times UFL_c - E \quad (38.5)$$

5.5.5.2.2 Ingestion au pâturage

L'ingestion d'herbe pâturée par les génisses est gérée par le même enchaînement d'équations que les vaches en lactation au pâturage. Les quantités d'herbe ingérée sont tout d'abord calculées sans apports de concentrés (**Qh_{sc}**) en tenant compte de la disponibilité de l'herbe limitant l'ingestion (équations 14, 15 et 16).

En connaissant **Qh_{sc}** et la valeur nutritive de l'herbe ingérée (**UFL_h**), l'énergie ingérée sans concentrés est ainsi déterminée. Comme en période d'alimentation en stabulation, si cette énergie n'est pas suffisante pour couvrir les besoins, une

complémentation est apportée. En utilisant l'équation 38.3, la quantité de concentrés à distribuer est estimée en prenant en compte la densité énergétique de l'herbe (**DEh**).

La quantité d'herbe ingérée compte-tenu des apports en concentrés est déterminée en utilisant l'équation 38.4 et la valeur de l'encombrement de l'herbe (**UELh**).

Une fois ces étapes effectuées, l'énergie ingérée est connue (équation 38.5).

5.6 Validation du modèle : cas du lot des vaches laitière en lactation

Afin d'évaluer le niveau de précision et de vraisemblance du modèle mais aussi son adéquation avec les objectifs de construction du modèle, il convient de présenter une validation du modèle (Tedeschi, 2006) permettant de définir son domaine de validité (Rykiel, 1996). Parmi toutes les techniques d'évaluation d'un modèle (Tedeschi, 2006), nous avons choisi de présenter ici une étude du comportement du modèle et une comparaison des réponses du modèle avec des situations réelles. L'orientation principale du modèle étant la production de lait en fonction de l'offre alimentaire, la validation et l'évaluation du modèle est focalisée sur la réponse en lait.

5.6.1 Etude du comportement du modèle

Le comportement du modèle est étudié sur sa capacité à répondre à des variations de paramètres de production en regard des objectifs de modélisation. La sensibilité du modèle développé à la conduite du troupeau (distribution des vêlages, chargement au pâturage), aux caractéristiques zootechniques (potentiel laitier des animaux) et aux caractéristiques de la ration (digestibilité des fourrages, apports de concentrés) est étudiée dans cette partie.

5.6.1.1 Effet de la répartition des vêlages

Plusieurs distributions des vêlages ont été testées afin de vérifier que le modèle est bien sensible à ce paramètre. En effet, la distribution des vêlages est l'une des principales variables permettant de faire varier la répartition de la production au cours du temps et donc, les besoins du lot.

Ces simulations ont été effectuées toutes choses égales par ailleurs, hormis la distribution des vêlages. Les caractéristiques du troupeau et de la ration sont détaillées dans la simulation de référence présentée ultérieurement (Tableau 4, partie 5.6.1.2).

Les distributions testées sont de quatre types (Figure 12 – graph a):

- vêlages groupés sur une seule semaine
- similaire à une « loi normale » : les vêlages sont groupés sur 12 semaines avec un étalement symétrique avec un pic des vêlages à 6 semaines
- distribution bimodale : les vêlages sont groupés sur 12 semaines avec un étalement symétrique présentant une répartition bimodale avec deux pics de vêlages centrés sur la 2^{ème} et la 9^{ème} semaine

- similaire à une « loi de Fisher » : les vêlages sont groupés sur 12 semaines avec un étalement asymétrique répartition très fréquente dans les exploitations (Jacquot *et al.*, 2010).

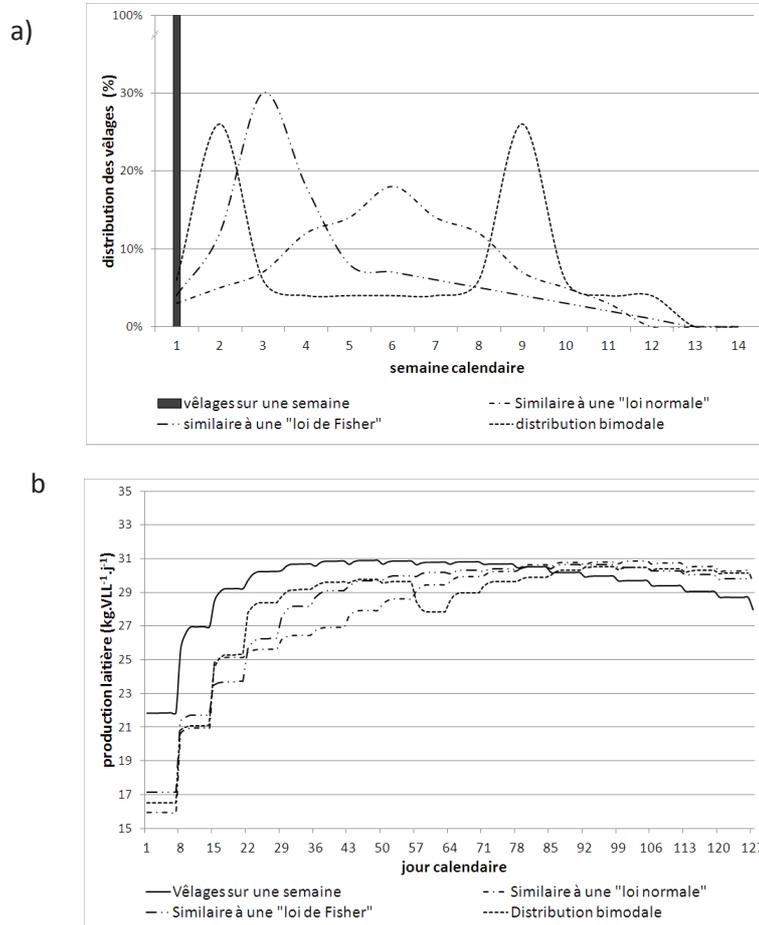


Figure 12: Effets de différentes distribution des vêlages (figure a) sur la production laitière (figure b)

Toutes les courbes de production laitières (Figure 12 – graph b) présentent un aspect non lisse, en « marche d’escalier ». Ce phénomène s’explique par le pas de temps hebdomadaire du modèle de structure démographique du troupeau.

La première simulation groupée sur une semaine permet de vérifier que la courbe de production laitière induite correspond à la courbe de lactation d’une vache laitière, puisque tous les animaux sont considérés identiques entre eux. Ainsi le modèle simule bien une augmentation rapide de la production laitière sur les 3 premières semaines, le pic de lactation est atteint entre les semaines 5 et 8, puis la production diminue lentement au fil des semaines de lactation. Cette courbe est en adéquation avec celles décrites par Grossman et Koops et Faverdin *et al.*,(2003, 2011). Les deux distributions respectivement similaires à une loi normale ou une loi de Fisher présentent le même profil de courbe de lactation, tout en étant plus progressives. Le pic de lactation de la répartition « Fisher » et « normale » se situe respectivement vers 60 et 80 jours, soit vers la 8^{ème} et 11^{ème} semaine. Le pic de lactation forme un palier qui est d’autant plus

important que l'étalement des vêlages l'est. Le simulateur permet également de simuler la production laitière d'un lot de vaches laitières vêlant selon une répartition bimodale. Comme le présente le graph b, la production laitière augmente rapidement après le début des vêlages du premier pic, de façon similaire aux autres courbes étudiées. Un décrochement dans la production laitière apparaît. Il est dû à présence dans le lot des nouveaux animaux ayant vêlé et débutant leur lactation. Leur production laitière est alors faible, diminuant ainsi le rendement laitier du lot. Une fois le 2^{ème} pic de lactation passé, les animaux voient leur production laitière augmenter rapidement.

Ainsi, le modèle de structure démographique du troupeau, à travers notamment l'utilisation du concept de l'individu pilote, nous permet bien de simuler des distributions différentes de vêlages.

5.6.1.2 A l'auge : effets de la digestibilité du fourrage et du potentiel laitier

A partir d'une simulation de référence, détaillée dans le Tableau 4, nous avons étudié les impacts de la variation de certains paramètres de production (potentiel laitier, digestibilité de la ration de base) toutes choses égales par ailleurs, sur la production laitière.

Tableau 4 : paramétrage de la simulation de référence et plage de variation des paramètres de production choisis

Paramètres	Simulation de référence	Plage de variation des paramètres			
<i>Caractéristiques du troupeau</i>					
Effectifs des vaches laitières	40				
Taux de renouvellement (%)	28%				
Distribution des vêlages	Similaire à une « loi normale »				
<i>Paramètres zootechniques :</i>					
Potentiel laitier (kg.VLL ⁻¹ .an ⁻¹)	7500	5500	6500	8500	9500
Poids Vif moyen (kg)	650				
Note d'Etat moyenne	3.14				
<i>Caractéristiques de la ration</i>					
Ration de base (dmo –(UFL))	0.71 (0.85)	0.64 (0.75)	0.67 (0.80)	0.74 (0.90)	
Apports de concentrés (kg.VLL ⁻¹ .an ⁻¹)	1200				

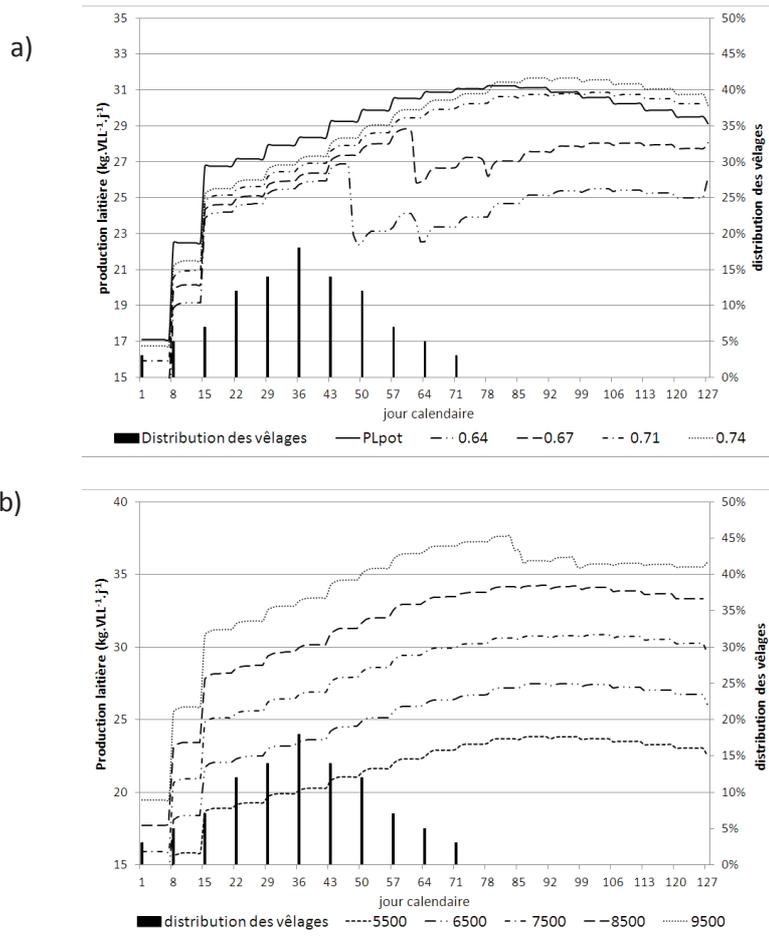


Figure 13 : Impacts de paramètres de production sur la production laitière, digestibilité de la ration de base (graph a) et potentiel laitier (graph b)

Pour tester la réponse du modèle d'ingestion et de production laitière face à l'offre alimentaire, nous avons fait varier la digestibilité de la ration de base sur un lot en début de lactation, toutes choses égales par ailleurs (graph a). Le début de lactation se passe de façon cohérente par rapport aux courbes de lactation, également présentées dans la Figure 12, graph b et dans la littérature (Grossman et Koops, 2003, Faverdin *et al.*, 2011). La production augmente progressivement et d'autant plus que la ration est de bonne qualité. Cependant, même la ration de base présentant la meilleure qualité (0.74 dmo, 0.90 UFL) ne permet pas de réaliser la production laitière potentielle, du fait d'une capacité d'ingestion des animaux limitante dans les premières semaines de lactation (Chilliard *et al.*, 1987, Reist *et al.*, 2002). Les animaux mobilisent alors leurs réserves corporelles pour répondre aux besoins de lactation (Friggens et Badsberg, 2007). Pour les rations de base les plus médiocres (0.64 et 0.67 dmo soit 0.75 et 0.80 UFL), les processus de mobilisation des réserves s'interrompent respectivement au cours de la 6^{ème} et 8^{ème} semaine de lactation. Le pool d'énergie mobilisable est alors épuisé et ne permet plus de produire plus de lait que l'énergie ingérée ne le permet, provoquant ainsi une importante chute de lait, d'autant plus importante que l'écart entre l'énergie ingérée et l'énergie nécessaire pour satisfaire la production laitière est conséquent. Ces courbes révèlent une deuxième chute de production laitière respectivement en jour 66 et 76, due au démarrage de la phase de pic de lactation pour les animaux ayant vêlé entre la 4^{ème} et 6^{ème} semaine. Une fois cette phase passée, la production laitière

augmente progressivement en liaison avec l'augmentation de la capacité d'ingestion des animaux (Chilliard *et al.*, 1987, Faverdin *et al.*, 2011). Sur les deux courbes correspondant aux rations les plus riches, l'écart entre la production laitière réalisée grâce à la mobilisation des réserves corporelles et la production laitière potentielle diminue au fur et à mesure des semaines de lactation en rapport à l'augmentation croissante de la capacité d'ingestion. Le retour à l'équilibre énergétique, correspondant à l'expression du potentiel laitier, s'effectue entre les semaines 11 et 13 ce qui est conforme aux travaux de (Buttchereit *et al.*, 2010). Ce retour s'effectue d'autant plus rapidement que la ration de base est riche. Une fois l'équilibre énergétique rétabli et dépassé, l'excédent énergétique est valorisé sous forme de lait permettant de produire plus que la production laitière potentielle et de reconstituer les réserves corporelles.

Le graph b présente quatre simulations où la production laitière potentielle varie entre 5500 et 9500 kg par vache et par an, toutes choses égales par ailleurs. Les profils de lactation sont quasiment parallèles entre eux, excepté la simulation avec un potentiel laitier de 9500. Les écarts entre les moyennes des simulations croissantes sont relativement stables ($3.12 \text{ kg.VLL}^{-1}.\text{j}^{-1} \pm 0.30$). Seul le profil de la simulation 9500 $\text{kg.VLL}^{-1}.\text{j}^{-1}$ présente un décrochement de production laitière (jour 83). La ration ne permet pas dans ce cas-là de couvrir les besoins déterminés par le potentiel laitier, et lorsque le potentiel de mobilisation des réserves corporelles est épuisé, la production laitière réalisée ne dépend plus que de l'énergie ingérée.

5.6.1.3 Au pâturage : effets du chargement, du potentiel laitier et des apports de concentrés

L'ingestion, et donc la production laitière au pâturage est influencée par de nombreux facteurs, regroupés en cinq catégories par Delagarde et O'Donovan (2005): les facteurs liés à l'animal, à la gestion du pâturage, aux compléments distribués, à la prairie et au climat. Nous testerons l'effet de facteurs issus des trois premières catégories sur la production laitière. Toutes les simulations sont effectuées toutes choses égales par ailleurs (Tableau 5) et sur une même parcelle. Le temps de séjour maximal pour toutes les simulations est fixé à 16 jours, correspondant à la date de sortie de la simulation de base selon les règles choisies du pâturage tournant simplifié, soit la sortie déclenchée lorsque la production laitière réalisée correspond à 90% de la production laitière maximale atteinte sur la parcelle (Hoden *et al.*, 1991a, Delaby *et al.*, 2001). Cependant, le lot peut sortir de la parcelle en dessous de ce seuil toujours selon cette même règle.

Tableau 5 : paramétrage de la simulation de référence et plage de variation des paramètres de production choisis

Paramètres	Simulation de référence	Plage de variation des paramètres choisis		
<i>Caractéristiques du troupeau</i>				
Effectif de vaches laitières (VLL)	40			
Taux de renouvellement (%)	28%			
Distribution des vêlages	Similaire à une « loi normale »			
<i>Paramètres zootechniques :</i>				
Potentiel laitier (kg.VLL ⁻¹ .an ⁻¹)	25 (7500)	20 (6000)	30 (8500)	35 (10000)
Poids Vif moyen (kg)	650			
Note d'Etat moyenne	3			
<i>Caractéristiques de la ration</i>				
Apports de concentrés (kg.VLL ⁻¹ .j ⁻¹ , (kg.VLL ⁻¹ .an ⁻¹))	3 (1000)	0 (0)	6 (1800)	9 (2700)
<i>Caractéristiques de la parcelle</i>				
Chargement (UGB.ha ⁻¹)	7.5	5	10	12.5
Biomasse au ras du sol (kg.ha ⁻¹)	2750			

Le graph a de la Figure 14 présente les simulations avec différents niveaux d'apports d'aliments concentrés. Plus l'apport est grand, plus les animaux produisent en accord avec les résultats d'études menées par Delaby *et al.*,(2003), Horan *et al.*,(2005) McEvoy *et al.*,(2008). La production moyenne sur la parcelle pour la simulation sans concentré est de 21.52 kg pour une production laitière potentielle de 25 kg. Ce résultat est cohérent avec le fait que les vaches sont dans l'impossibilité de couvrir leurs besoins dus à la lactation avec l'herbe pâturée seule (Delaby *et al.*, 2003, Peyraud et Delaby, 2005). Les lactations des simulations avec 6 et 9 kg.VLL⁻¹.j⁻¹ présentent des profils moins marqués que les deux premières avec peu d'écart entre le maximum de production sur la parcelle et le premier jour de lactation ou le dernier sur la parcelle. La hausse des apports de concentrés impliquent une augmentation des quantités ingérées mais diminuent les quantités d'herbe ingérée de part la substitution entre les concentrés et l'herbe (Delaby *et al.*, 2003, McEvoy *et al.*, 2008, Delagarde *et al.*, 2011b). La production laitière dépend ainsi moins de la variation journalière de l'offre herbagère. La différence des moyennes de production entre les simulations avec 6 et 9 kg de concentrés est faible (0.95 kg) indiquant une efficacité limitée des 3 kg de concentrés en plus. La production laitière permise par l'offre herbagère et les 9 kg concentrés dépasse largement la production laitière potentielle des animaux sur la parcelle (production réalisée moyenne 25.53 kg pour un potentiel de 25 kg alors que l'énergie ingérée permet en moyenne d'effectuer 30.38kg). La simulation avec 3 kg de concentré pour une production laitière potentielle de 25kg présente une efficacité de 0.60 kg de lait par kg de concentré, soit une efficacité moindre par rapport à la synthèse bibliographique effectuée par Delaby *et al.*,(2003) qui est de 0.74 kg de lait par kg de concentré mais acceptable selon l'écart-type de la synthèse (± 0.46), et cohérente avec les références citées par Hoden *et al.*,(1991a).

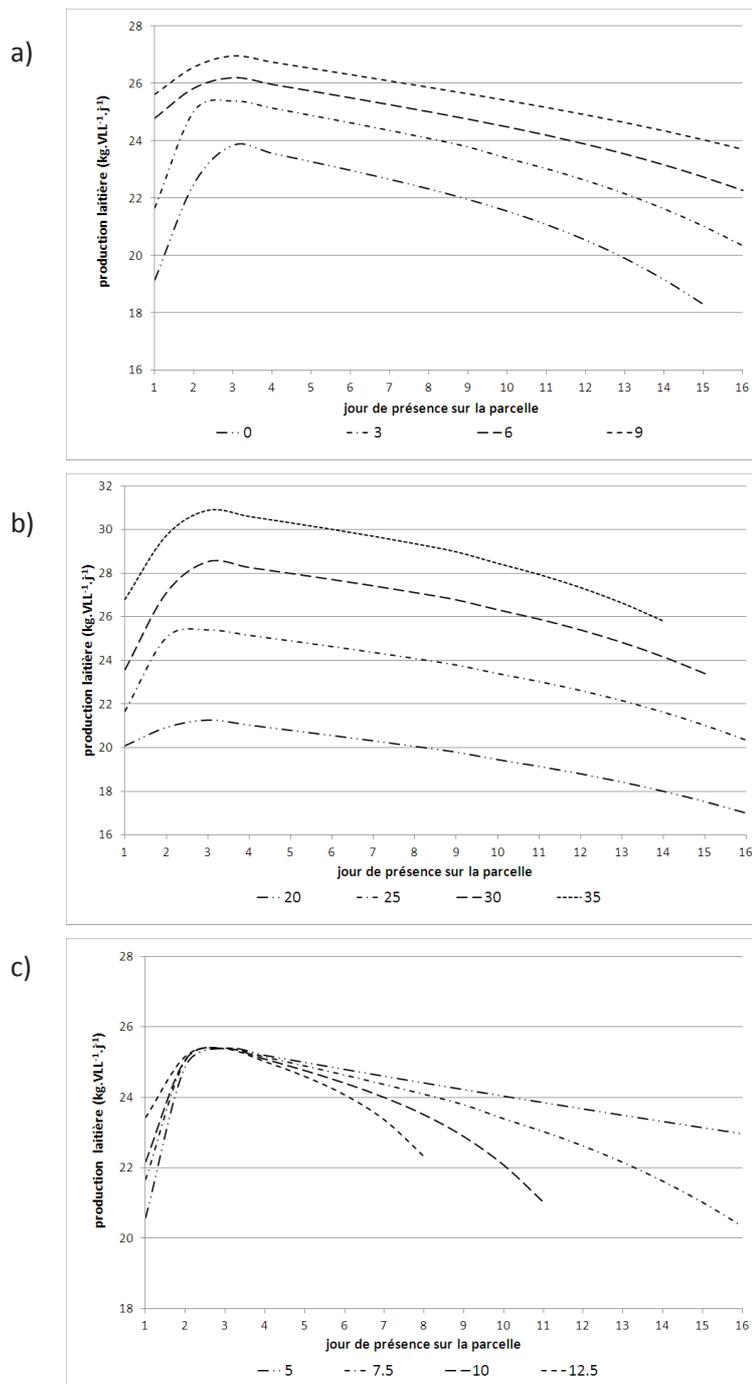


Figure 14 : étude du comportement du modèle au pâturage:

Impacts des quantités de concentrés distribuées (graph a, en kg.VL⁻¹.j⁻¹), de la production laitière potentielle (graph b, en kg.VL⁻¹.j⁻¹) et du chargement instantané sur la parcelle (graph c, en UGB.ha⁻¹)

Les simulations dont seul le potentiel laitier de l'animal varie (graph b), permettent de voir que plus le potentiel est important, plus les vaches produisent sur la parcelle. Les vaches ayant un potentiel de 20 kg par jour ont un profil de lactation plus écrasé, avec une légère augmentation lors des trois premiers jours sur la parcelle puis une lente diminution de la production journalière. Ce profil est dû au fait que la production laitière permise par l'offre herbagère dépasse la production laitière potentielle des animaux (la moyenne des productions réalisées est de 19.57 kg.j⁻¹). Une partie de l'excédent énergétique ingéré est valorisé sous forme de lait (1,27 kg de lait en plus au pic de production sur la parcelle). Les animaux ayant un potentiel de 25 kg.j⁻¹ atteignent leur potentiel mais la moyenne de production sur la parcelle est inférieure au potentiel

(23.32 kg). L'offre herbagère et l'apport en concentré de 3 kg par jour ne permet pas aux vaches dont la production potentielle est de 30 et 35 kg par jour d'atteindre ce potentiel. La production laitière est limitée par le potentiel de la ration, et donc, de la parcelle. Ce résultat est cohérent avec les travaux de Peyraud et Delaby (2005) qui indiquent que l'herbe pâturée avec peu ou pas de concentrés ne permet pas aux vaches à haut potentiel de l'exprimer.

Le graph c présente l'impact de la conduite du troupeau et la gestion du pâturage sur les productions laitières en testant plusieurs niveaux de chargement. Plus les chargements sont élevés (10 et 12.5 UGB.ha⁻¹), plus le seuil (diminution de la production laitière par rapport à la production maximale atteinte sur la parcelle) déclenchant le changement de parcelle intervient tôt (J11 et J8 respectivement). Ce seuil n'est jamais atteint avant le temps de séjour maximal fixé à 16j pour le chargement le plus faible (5 UGB.ha⁻¹), impliquant une diminution de la valorisation de l'herbe à pâturer. La production laitière maximale atteinte sur la parcelle est identique aux quatre simulations, puisqu'elle représente le potentiel laitier permis par la parcelle. Les moyennes des productions laitières journalières par vaches des quatre simulations ne varient quasiment pas (23.78 kg.VLL⁻¹ ±0.37), contrairement à ce qui est indiqué dans la littérature (Peyraud et Delaby, 2005, McCarthy *et al.*, 2011). En effet, McCarthy *et al.*, (2011) argumentent que l'augmentation du chargement implique une réduction de l'herbe offerte, et donc de la qualité de l'ingéré. Or, la règle régissant le déplacement du lot d'un pâturage à l'autre est gérée en maîtrisant la diminution de la production laitière par rapport à la production maximale atteinte en utilisant les capacités d'adaptation des animaux à une plus grande variation de l'offre alimentaire. *A contrario*, l'augmentation du chargement permet d'accroître drastiquement les rendements par hectare (entre 119 kg.ha⁻¹ pour le chargement le plus faible et 302 kg.ha⁻¹ pour le plus élevé) sur une même parcelle en accord avec les résultats de la méta-analyse réalisée par McCarthy *et al.*, (2011) et les travaux de Hoden *et al.*, (1991b).

5.6.2 Validation par rapport à des données expérimentales

Les méthodes d'évaluation de la précision du modèle (**P** : prédits) par rapport à des données réelles expérimentales (**O** : observés) employées ici sont, outre le coefficient de corrélation et l'analyse de la régression linéaire des valeurs expérimentales en fonction des valeurs prédites par le modèle, l'étude du RMSD (the root mean-squared deviation, racine du MSD) (Gauch *et al.*, 2003, Jouven *et al.*, 2006b). MSD est décomposable en plusieurs éléments : squared bias (**SB**), nonunity slope (**NU**) et lack of correlation (**LC**) permettant d'expliquer les composantes de la déviation entre les valeurs observées et prédites (Gauch *et al.*, 2003). En outre, la proportion de variation expliquée par le modèle peut-être étudiée à travers l'efficacité statistique du modèle (**MEF**) (Tedeschi, 2006, Bellocchi *et al.*, 2010).

5.6.2.1 Modèle de lactation en stabulation

5.6.2.1.1 Description des expérimentations utilisées et paramétrage du simulateur

Pour valider le modèle générique de lactation, les données de deux lots expérimentaux ont été utilisées que nous appellerons Lot 1, lot témoin décrit dans l'étude de Pomiès *et al.*,(2010) et Lot 2, lot témoin de l'expérience Pomiès *et al.*,(2008).

A partir des données expérimentales, le modèle a été paramétré afin de simuler les mêmes conditions de ces deux expériences. **Plpotmax** a été estimé en effectuant la moyenne des productions laitières réalisées entre les semaines 5 et 8 de lactation, méthode proposée par Faverdin *et al.*,(2007b). La quantité de concentrés à distribuer (en g.kg^{-1} PLpot) a été calculée à partir des quantités ingérées réelles de concentrés et l'estimation de **PLpot**.

Tableau 6 : description des paramètres de simulation des deux lots expérimentaux (Lot 1, Lot 2)

Paramètre	Lot 1	Lot 2
Effectif (VLL)	12 dont 4 primipares	10 dont 3 primipares
<i>Paramètres zootechniques :</i>		
Production laitière potentielle au pic (kg)	Primipares 30.5 Multipares 36.8	Primipares 27 Multipares 34.6
Poids Vif moyen (kg)	631	686
Note d'état moyen	2.9	3.15
<i>Caractéristiques de la ration</i>		
Ration de base	Ad libitum: mélange de fourrage (0.85 UFL _r , 0.94 UEL _r)	Ad libitum: mélange de fourrage (0.87 UFL _r , 1.04 UEL _r)
Apports de concentrés	Primipares: 0.292 kg.kg PLpot ⁻¹ Multipares: 0.314 kg.kg PLpot ⁻¹	Primipares: 0.191 kg.kg PLpot ⁻¹ Multipares: 0.146 kg.kg PLpot ⁻¹

5.6.2.1.2 Comparaison du lait prédit par le modèle avec les données expérimentales

Les Figure 15 et Figure 16 représentent les courbes générées par les données expérimentales de Lot 1 et 2 (moyenne du lot associée de l'erreur-type), les valeurs du modèle et l'estimation de la production laitière potentielle des lots au jour le jour.

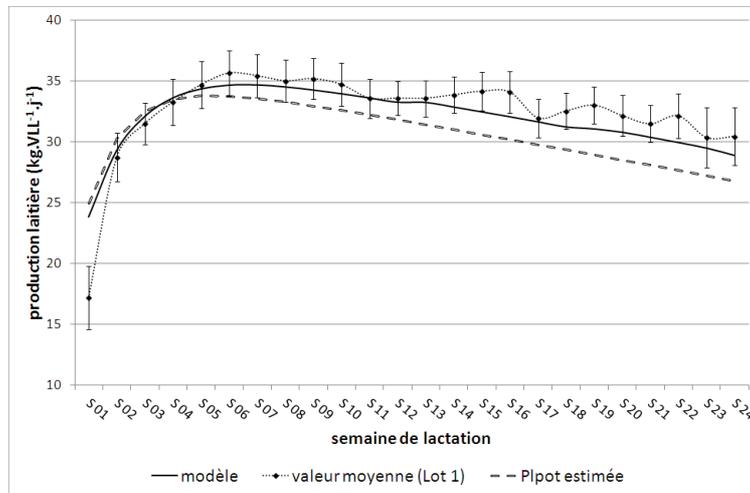


Figure 15 : comparaison entre les données expérimentales du Lot1 et les valeurs prédites par le modèle de la semaine 1 à 24 post-partum. Les données expérimentales sont présentées avec l'erreur-type associée

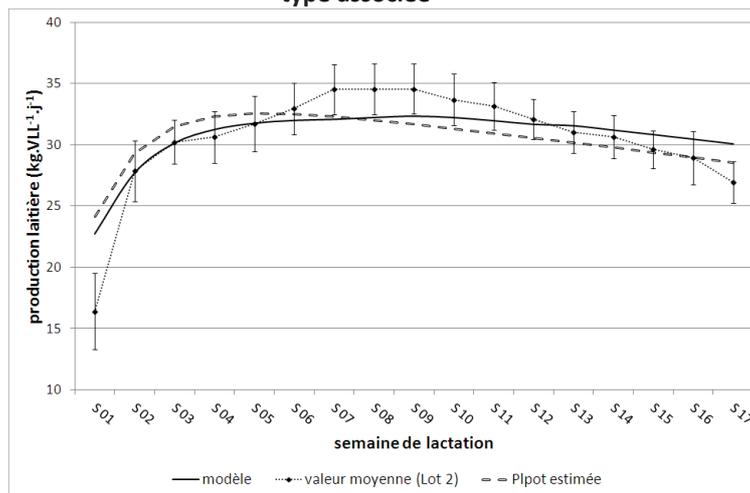


Figure 16 : comparaison entre les données expérimentales du Lot2 et les valeurs prédites par le modèle de la semaine 1 à 24 post-partum. Les données expérimentales sont présentées avec l'erreur-type associée

Valeurs (kg PL _{prod.VLL⁻¹.j⁻¹)}	Lot 1	Lot 2
RMSD	1.8	2.1
MSD	3.1	4.4
\bar{P}	31.9	30.7
\bar{O}	31.4	30.6
Valeurs (%)		
SB	8.3	0.5
NU	25.1	66.4
LC	66.6	33.1
R ²	0.84	0.92
MEF	0.8	0.7

Tableau 7 : analyse statistique pour évaluer la précision des prédictions du modèle face aux données observées (Lot 1 et 2)

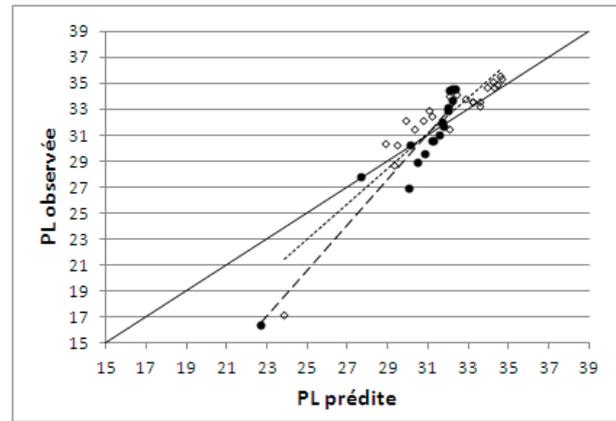


Figure 17 : Comparaison entre les valeurs observées and prédites de production laitière (kg.VLL-1.j-1) pour le lot 1 (◇, droite de régression ----) et pour le lot 2 (●, droite de régression ---)

5.6.2.1.2.1 Lot 1

Le modèle est capable de prédire la production laitière de manière cohérente par rapport à la moyenne des valeurs réelles (Figure 15) et, de façon relativement précise : prédiction bonne à 1,8 kg de lait par jour et par vache près (RMSD, Tableau 7), soit une approximation de 5% de la production observée journalière. Le modèle tend à surestimer la production laitière (Mean Bias, MB=0.5 kg, $MB = \bar{P} - \bar{O}$), principalement à partir de productions laitières supérieures à 30kg.VLL⁻¹.j⁻¹. La régression linéaire sur les valeurs prédites permet d'estimer les valeurs observées à 84% (R², Tableau 7).

Le modèle reproduit de façon satisfaisante la courbe de lactation des vaches du Lot 1 avec l'augmentation rapide de la production laitière en début de lactation (semaine 1 à 5), le pic de lactation en semaine 6, 7 et 8 et ensuite, la lente diminution du rendement laitier. Cependant, le modèle surestime la production moyenne de la première semaine par rapport à la réalité (23.8 kg.VLL⁻¹.j⁻¹ contre 17.2 pour les observés), tout en restant cohérent avec la valeur estimée de la production laitière potentielle moyenne journalière de la première semaine de lactation. La ration mélangée riche (0.85 UFL) et les niveaux importants de concentrés (0.3 kg.kg PLpot⁻¹ soit en moyenne, 9.6 kg par jour) permettent de couvrir les besoins des animaux et leur permettent d'exprimer leur potentiel laitier, et même de dépasser la production laitière potentielle estimée à partir de la semaine 5 de lactation. Ce phénomène est également bien simulé par le modèle.

La part non-ajustée du modèle par rapport aux données observées (MSD) est expliquée en partie par 8% de biais (SB) de la courbe de régression linéaire, 25% de rotation par rapport à l'axe Y=X représentant un modèle parfaitement ajusté, NU étant la pente de la droite de régression de Y sur X (Figure 17 et Tableau 7). Le reste de la déviation du modèle est expliqué à 66% par le manque de corrélation. Le calcul de l'efficacité du modèle (MEF) permet de dire que la proportion de la variation est expliquée à 80% par la droite $Y=f(X_1, \dots, X_n)$. Nous pouvons conclure que le modèle

permet de simuler de façon satisfaisante les productions laitières du Lot 1 puisqu'une grande part de la déviation entre X et Y est expliquée par le manque de corrélation (LC). Cette déviation peut-être imputée à un défaut de prédiction du modèle (absence de prise en compte ou non suffisamment d'un facteur) mais aussi à la variabilité des données observées, variabilité pouvant être expliquée par la variabilité interindividuelle au sein du lot.

5.6.2.1.2.2 Lot 2

La Figure 16 montre les courbes des productions laitières, moyenne des données du Lot 2 associées de l'erreur-type, des valeurs prédites par le modèle mais aussi de la production laitière potentielle estimée pour le lot. Contrairement au Lot 1, pour un potentiel laitier légèrement inférieur, les vaches reçoivent moins d'aliments concentrés (en moyenne $5.8 \text{ kg.VLL}^{-1}.\text{j}^{-1}$ pour les primipares et 4.4 pour les multipares).

La courbe des valeurs prédites par le modèle respecte la forme générale de la moyenne des productions laitières du Lot 2 (Figure 16) mais elle semble moins ajustée que pour le Lot 2, notamment lors de la période 8 à 12 semaines de lactation. En outre, comme sur l'étude du Lot 1, la production laitière prédite de la première semaine de lactation est largement surestimée (22.7 contre 16.4 kg de lait), point particulièrement déviant par rapport à la droite $Y=X$ sur la Figure 17. Cependant, la régression linéaire des valeurs prédites permet d'estimer les valeurs observées à 92% (R^2) et la différence entre les valeurs moyennes prédites et observées est très faible ($MB=0.1$ kg de lait). Le modèle permet de prédire à 2.1 kg de lait près (RMSD) ce qui implique une prédiction moins précise que dans le cas d'étude Lot 1. L'efficacité statistique du modèle est quant à elle de 70%.

La décomposition de la variation entre X et Y (MSD) permet de voir que la part de SB est minime (0.5%). NU représente en tout 66.4% du MSD, la droite de régression présente donc une variation importante par rapport à l'axe $Y=X$. Ceci peut être expliqué notamment par la valeur de la production laitière de la première semaine de lactation très surestimée, déviant ainsi la pente de régression. Le reste du MSD s'explique par un manque de corrélation important (33.1%), mais moindre que dans l'étude Lot 1.

Ainsi, le modèle semble un peu moins ajusté que dans l'étude précédente mais prédit cependant les productions laitières de façon satisfaisante. Le moindre ajustement peut également s'expliquer par la difficulté d'estimer le potentiel laitier et donc, la production laitière potentielle au jour le jour du lot à partir de données réelles d'animaux non alimentés selon leurs besoins, le concept de la production laitière potentielle ayant été justement construit afin de calculer les besoins et les apports souhaitables (Faverdin *et al.*, 2007b). Cette estimation est d'autant importante que **PLpot** est un élément moteur du modèle d'ingestion. Cependant, cette difficulté d'estimation ne présente pas de limite dans le cas d'étude de scénarios où le potentiel laitier est une donnée connue *a priori*.

5.6.2.2 Modèle de lactation au pâturage

5.6.2.2.1 Expérimentation utilisée :

Le lot expérimental utilisé pour cette validation provient d'une étude réalisée dans la ferme expérimentale de l'INRA Marcenat en 2009 (Farruggia *et al.*, 2010). Le lot a été conduit en pâturage tournant simplifié avec un chargement élevé ($1.8 \text{ UGB} \cdot \text{ha}^{-1}$) sur des prairies temporaires fertilisées ($80 \text{ uN} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$). Le lot n'a pas reçu d'aliments concentrés. Le lot est composé de 12 vaches en lactation dont quatre primipares ($\text{PV}=495\text{kg}$, $\text{NEC}=1.54$ en moyenne) qui se situent en moyenne en 19^{ème} semaine de lactation. En connaissant les productions laitières des jours J4, 5 et 6 des animaux de ce lot (vêlages étalés entre le 23/10/2008 et 03/04/2009), nous avons pu estimer la production laitière potentielle au pic de lactation du lot ($\text{PLmaxpot primipares} = 28 \text{ kg} \cdot \text{VLL}^{-1} \cdot \text{j}^{-1}$ et $\text{PLmaxpot multipares} = 30 \text{ kg} \cdot \text{VLL}^{-1} \cdot \text{j}^{-1}$). Nous avons également estimé à partir des données connues les paramètres nécessaires au bon fonctionnement du modèle de végétation (biomasse au ras du sol, densité du couvert, croissance de l'herbe).

Nous avons ainsi simulé un enchaînement de six parcelles entre le 24 mai et le 11 juillet 2009.

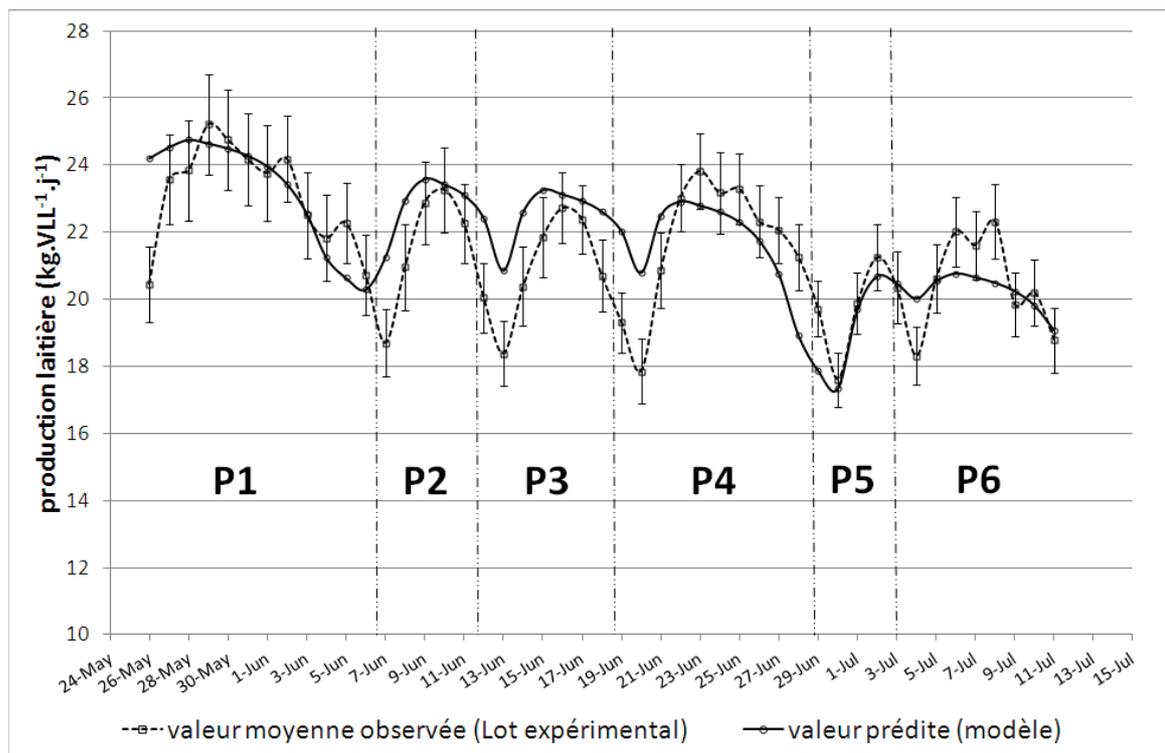


Figure 18 : comparaison entre un lot expérimental et les valeurs prédites par le modèle en système pâturage tournant simplifié (enchaînement de 6 parcelles, P1 à P6). Les valeurs moyennes expérimentales sont présentées avec l'erreur-type

Valeurs	($\text{kg PLprod} \cdot \text{VLL}^{-1} \cdot \text{j}^{-1}$)
RMSD	1.4
MSD	2.0

\bar{P}	21.8
\bar{O}	21.5
Valeurs (%)	
SB	5.0
NU	10.1
LC	84.9
R^2	0.51

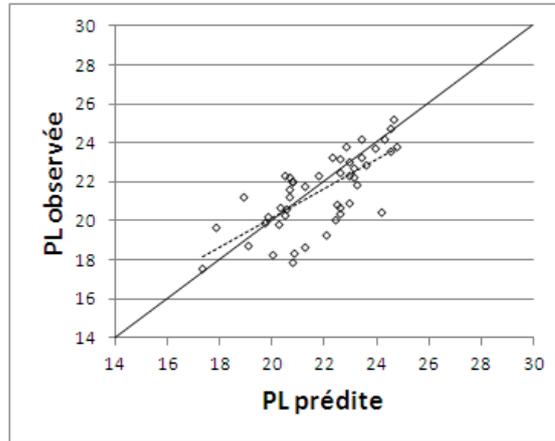


Tableau 8 : analyse statistique pour évaluer la précision des prédictions du modèle face aux données observées

Figure 19 : comparaison des valeurs observées et prédites de PLprod (kg.VLL-1.j-1, \diamond , droite de régression -----)

La Figure 18 représente la moyenne des productions lactières du lot associée de l'erreur-type et la prédiction du modèle au cours de l'enchaînement des parcelles simulées. Le modèle permet de simuler correctement les courbes de lactation type du système de pâturage tournant simplifié telles que l'ont décrit Hoden *et al.*, (1991a) et Delaby *et al.*,(2001). Cependant, de prime abord, le modèle peine à modéliser une chute de lait suffisante lors du changement de parcelle.

La précision du modèle est de 1.4 kg de lait par jour ce qui représente 6.5% de la production moyenne. La différence entre les moyennes prédites et observées sur la durée de l'enchaînement est de 0.3 kg de lait. La déviation moyenne entre les valeurs prédites et celles observées (MSD) est expliquée par un biais et une rotation de la droite de régression minime par rapport à l'axe $Y=X$ (15%), le reste étant dû à un manque de corrélation très important (85%). Ces informations indiquent ainsi que la structure du modèle est cohérente et permet de prédire correctement les quantités de lait produites au pâturage. Le manque de corrélation important et le coefficient de détermination relativement faible ($R^2=0.51$) peut s'expliquer par la variabilité des productions lactières des animaux induites au pâturage, phénomène particulièrement visible sur les parcelles P1, P4 et P6. De plus, le modèle de production lactière est en interaction forte avec le modèle de croissance de l'herbe (Jouven *et al.*, 2006a). Pour valider le modèle adapté au pâturage, il a fallu paramétrer le lot en lactation mais aussi les caractéristiques du couvert végétal de la parcelle en fonction des données connues, soit la biomasse à 5 cm et la hauteur d'herbe en entrée de la parcelle. Cependant, certains paramètres nécessaires au bon fonctionnement du modèle de croissance, n'étaient pas connus et durent être estimés à dire d'experts, tels que la densité du couvert, la biomasse au ras du sol, la croissance de l'herbe en présence des animaux... Nous avons donc ajusté les paramètres du couvert afin de reproduire les mêmes conditions d'entrée sur la parcelle, mais l'estimation des autres paramètres ne permet certainement pas de refléter exactement l'état du couvert végétal. Ceci peut expliquer la difficulté que le modèle a pour simuler une plus importante chute de production lactière en fin de temps de séjour sur la parcelle.

CHAPITRE VI

6 LE SOUS-MODELE « CONDUITE »

6.1 Structure et fonctionnement du sous-modèle de conduite

6.1.1 Définition des objectifs de production et planification

La finalité du système de production est de produire du lait selon l'offre alimentaire. Lors de notre démarche de modélisation, nous représentons l'exploitation agricole comme un couplage des éléments biotechniques en interaction et de la conduite appliquée par l'éleveur, autrement dit le système décisionnel. En soi, le terme biotechnique se réfère à un élément biologique, piloté et façonné par l'humain (Landais et Balent, 1993). Le système décisionnel de l'exploitation est ainsi composé des **objectifs de production**, déterminé par la finalité du système et par la structure de l'exploitation, et de son fonctionnement regroupant l'ensemble des **règles régissant les processus de décisions** (Le Gal, 2012). Ces règles sont mises en place de façon à atteindre les **performances** techniques et économiques en adéquation avec les objectifs de production.

Nous modélisons le système décisionnel selon ces deux composantes (Coleno et Duru, 1998, Martin, 2009) :

- ◆ **La stratégie**, qui est l'explicitation du projet de production de l'éleveur dans lequel il planifie le système de production en cohérence avec ses objectifs de production (Girard, 1995)
- ◆ **Le pilotage**, qui est formé des savoirs-comprendre des éleveurs leur permettant d'analyser les informations sur l'état des éléments biotechniques, des savoir-faire qui définissent les modalités d'actions et les interventions techniques en elles-mêmes (Coleno et Duru, 1998, Martin, 2009). Le pilotage regroupe ainsi l'ensemble des **pratiques** de l'éleveur. Les pratiques sont définies comme l'ensemble des activités ou interventions matérielles intentionnelles et régulières que l'éleveur met en œuvre dans le cadre de la conduite des processus de production agricole (Landais et Balent, 1993)

C'est à travers les objectifs de production et le paramétrage des règles de décisions que nous pouvons traduire les logiques de production de l'éleveur. Ainsi, selon l'exemple cité par Coleno et Duru (1998), un éleveur laitier herbager ayant une logique de production plus intensive cherchera à disposer en permanence de ressources fourragères de qualité de façon à se rapprocher du potentiel de production des animaux. Il ajustera alors le chargement, sera attentif à l'offre herbagère au pâturage et au moment le plus propice pour changer de parcelle. A l'inverse, pour un éleveur ayant une logique de production plus extensive, les règles de décisions seront raisonnées en fonction de l'état des ressources alimentaires. Les fluctuations quantitatives et qualitatives de l'herbe seront alors absorbées par les animaux à travers leurs capacités à mobiliser ou capitaliser leurs réserves corporelles.

Les interventions techniques sont donc organisées par les éleveurs, à différents horizons temporels, selon leurs objectifs de production (Bellon *et al.*, 1995). Ils coordonnent ainsi leurs actions sur les différentes composantes en relation (Hémidy *et al.*, 1993). La mise au point des règles de conduite du système de production s'effectue selon trois modalités (Coleno et Duru, 1998, Andrieu, 2006, Martin, 2009) :

- ◆ Les règles de dimensionnement : l'éleveur dimensionne son système de production en allouant des ressources (prairies, fourrages, temps de travail) à une pratique donnée. L'éleveur prend en compte les aspects temporels lors du processus de dimensionnement. Il définit ainsi les plages temporelles lors desquelles une intervention x est possible ou nécessaire.
- ◆ Les règles de coordination : elles ont pour but de gérer l'enchaînement des interventions techniques au fil du temps et de prioriser les pratiques entre elles.
- ◆ Les règles d'ordonnancement : elles permettent d'établir l'ordre des tâches d'une pratique.

Le dimensionnement des moyens de production (surfaces dédiées à un usage ou une pratique, fourrages alloués à tels ou tels lots) pour les différentes pratiques est la matérialisation de la stratégie de l'éleveur. Les règles de coordination et d'ordonnancement forment le pilotage des pratiques appliquées aux systèmes biotechniques.

Par ailleurs, pour faciliter la prise en compte de la planification de pratiques associées à une période donnée, nous utilisons le concept de **saisons-pratiques** développé par Bellon *et al.* (1999), et défini comme étant une période de l'année durant laquelle l'éleveur mobilise une combinaison de ressources comparables. Nous étendons ce concept à l'association d'une combinaison de pratiques avec une période donnée, puisque l'approche « saisons-pratiques » repose également sur l'analyse des pratiques d'utilisation du territoire au cours du temps et donc, des règles de dimensionnement. Ainsi l'éleveur va planifier l'usage des parcelles selon ses objectifs stratégiques et en tenant compte des contraintes physiques du parcellaire (Figure 8 du chapitre 4) que les règles de pilotage définies appliqueront au cours de la saison.

6.1.2 Utilisation du concept de « saisons-pratiques » : règle de changement d'une saison à l'autre

Bien que les saisons-pratiques soient propres à chaque éleveur (Bellon *et al.*, 1999, Léger *et al.*, 2000), nous avons décidé d'associer les saisons-pratiques avec les caractéristiques climatiques des saisons et leurs incidences sur la dynamique de végétation ainsi que les pratiques spécifiques associées ou modes d'utilisation du parcellaire. En effet, le mot saison est défini comme étant une époque de l'année caractérisée par un climat relativement constant et par l'état de la végétation. Il est cependant difficile de cerner précisément les bornes des saisons d'une année et d'autant plus d'une année à l'autre (Bellon *et al.*, 1999). Outre l'état de la végétation, les saisons-pratiques sont différenciées par une modification des pratiques des unes aux autres (Léger *et al.*, 2000). Compte-tenu de ces définitions, nous avons développé des règles définissant le déclenchement du changement d'une saison à une autre.

Nous avons ainsi distingué cinq saisons-pratiques que sont **l'hiver, le déprimage, le printemps, l'été et l'automne**. La période hivernale est caractérisée par le repos végétatif et la dormance des couverts végétaux. Les animaux sont alors en stabulation et alimentés à base de fourrages conservés. La période hivernale est donc délimitée par la mise à l'herbe des animaux et la rentrée à l'étable. Les quatre autres saisons-pratiques sont associées au pâturage des animaux.

Le déprimage est une saison associée à des pratiques de pâturage spécifiques. Cette saison peut ne pas exister, en fonction des pratiques planifiées par l'éleveur. Elle est déclenchée par la mise à l'herbe des lots coïncidant avec le démarrage de la croissance des couverts herbacés. La mise à l'herbe est provoquée uniquement quand la biomasse accessible est suffisante pour accueillir un lot. Elle est ainsi déclenchée par trois conditions requises de manière concomitante :

- Une biomasse accessible minimale sur les parcelles planifiées « pâturage », que ce soit une planification déprimage ou non
- Une date-seuil minimale à dépasser
- Une température moyenne minimale sur quatre jours consécutifs à dépasser

Le **déprimage** se définit comme un pâturage précoce des parcelles destinées à la fauche. Cette pratique se caractérise par un passage rapide d'un lot spécifique sur quelques parcelles seulement et se termine juste avant que l'épi soit consommable (stade épi à 5cm du sol) (Crepel et Claisse, 2009). La saison « déprimage » n'est ainsi pas considérée comme une « vraie » saison : elle est donc concomitante avec le printemps. En effet, la mise à l'herbe déclenche le déprimage pour certaines parcelles et pour certains lots, mais également le pâturage des autres lots non affectés au déprimage. Ces derniers pâturent alors les parcelles réservées selon la planification de la saison « printemps ». La fin du déprimage est provoquée par le passage des animaux sur

l'ensemble des parcelles planifiées « déprimage ». Cependant, les animaux ne dépriment plus au-delà d'une date limite pour ne pas pénaliser la pousse de l'herbe.

Le printemps se caractérise par une croissance importante des couverts herbacés alors que l'été se distingue par un ralentissement, voire un arrêt de cette croissance (Léger *et al.*, 2000). Le passage du printemps à l'été s'effectue donc sur cette base. Cependant, selon la nature des couverts végétaux, cette transition ne s'effectue pas à la même période (Bellon *et al.*, 1999, Guerin et Agreil, 2007). Pour déclencher la transition du printemps à l'été, nous nous sommes basés sur la somme des températures correspondant au stade de floraison spécifique du couvert végétal des prairies. Dans le module de croissance végétale, le stade de floraison coïncide avec un indicateur, ST2, déclenchant la fin de la saison reproductive du couvert végétal (Jouven *et al.*, 2006). Le déclenchement du début de la saison « été » s'effectue lorsque la somme des températures atteint celle correspondant à la moyenne des indicateurs ST2 de l'ensemble des parcelles. Cependant, au-delà d'une date-seuil limite paramétrable, le simulateur déclenche le passage à la saison « été ».

Les pratiques associées à la saison « été » sont les fauches de deuxième coupe et le pâturage. L'été correspond également à l'agrandissement des surfaces allouées au pâturage après la récolte des premières coupes. L'**automne** correspond à un deuxième agrandissement de la surface pâturable après la libération des surfaces ayant été fauchées en regains. Ainsi, le passage de la saison « été » à la saison « automne » est déclenché par une des deux conditions suivantes :

- Toutes les parcelles planifiées pour une deuxième coupe ont été fauchées
- Une date-seuil maximale est atteinte

L'automne se termine avec la rentrée étable des animaux et une alimentation distribuée en stabulation à base de fourrages conservés. La rentrée étable est déclenchée selon les mêmes règles et le même paramétrage que la mise à l'herbe, à savoir, une biomasse minimale atteinte et une température moyenne sur quatre jours consécutifs inférieure à un seuil fixé.

La majeure partie des règles de décision de passage d'une saison à l'autre repose sur des seuils tels que la biomasse minimale, une température moyenne atteinte ou encore une date-limite atteinte. Tous ces seuils sont paramétrables par l'utilisateur du simulateur de façon à pouvoir décrire une pluralité de situations correspondant à des logiques ou stratégies différentes de l'éleveur. Par exemple, comme le décrit Bellon *et al.*, (1995) dans son analyse de la conduite du pâturage au printemps, certains éleveurs privilégient une mise à l'herbe précoce afin de valoriser au mieux l'herbe de printemps et/ou économiser des fourrages stockés, au risque d'avoir des périodes de ruptures dans la pousse de l'herbe, alors que d'autres privilégient une mise à l'herbe tardive pour sécuriser la pousse, mais au risque de se faire déborder par celle-ci.

6.1.3 Description du pilotage des systèmes biotechniques par l'éleveur et de leur fonctionnement

6.1.3.1 Gestion des fauches

Règles de décision

La gestion des fauches est composée de quatre étapes consécutives, présentées dans la Figure 1 et qui sont :

- ◆ L'établissement de la liste des parcelles à faucher

Cette liste est élaborée chaque saison, à partir de la planification du parcellaire correspondant. Pour la saison « printemps », la liste se compose en premier des parcelles ayant une coupe précoce planifiée, et ensuite des parcelles planifiées en coupe tardive

- ◆ Le déclenchement de la période de fauche

La période de fauche est ouverte selon une condition principale qui est la biomasse accessible au-dessus de la hauteur de coupe. Les seuils de biomasse minimale sont différenciés selon les types de coupe, précoce, tardive ou regain, afin de traduire les objectifs de rendements que l'éleveur s'est fixé pour chaque fourrage. En effet, l'éleveur n'attend pas les mêmes rendements en 3^{ème} coupe et en 1^{ère} coupe ensilée. Pour les fauches réalisées lors de la saison printemps, un critère conditionnel à la période de fauche s'ajoute de façon à discriminer les fauches précoces des tardives. Les fauches précoces peuvent se réaliser entre une fourchette de sommes de températures, par exemple 780 et 1100 degrés-jours. Ces degrés-jours correspondent au stade de développement début et fin d'épiaison pour les systèmes laitiers en moyenne montagne décrits dans les référentiels fourragers du Massif central (Reuillon, 2008). Ces stades concordent également avec les repères saisonniers en sommes de températures des récoltes effectuées en début et fin de 1^{er} cycle des prairies d'altitude en conditions semi-continuelles (Baumont, 2011). Au-delà de la somme de température 1100 degrés-jours dans cet exemple, les fauches planifiées tardives peuvent être réalisées.

- ◆ L'acte-même de fauche

Une fois que la période de fauche est ouverte, la fauche du jour ne s'effectue que si les précipitations des X jours à venir sont inférieures à un seuil paramétré, par exemple 2mm. Les X jours dont les précipitations sont contrôlées est une durée paramétrable et dépendante du type de fauche, la fauche précoce correspondant à des fourrages fermentés et la fauche tardive à du foin séché au sol. Par exemple, un ensilage d'herbe préfanée nécessite une plage météo favorable moins importante que du foin séché au sol.

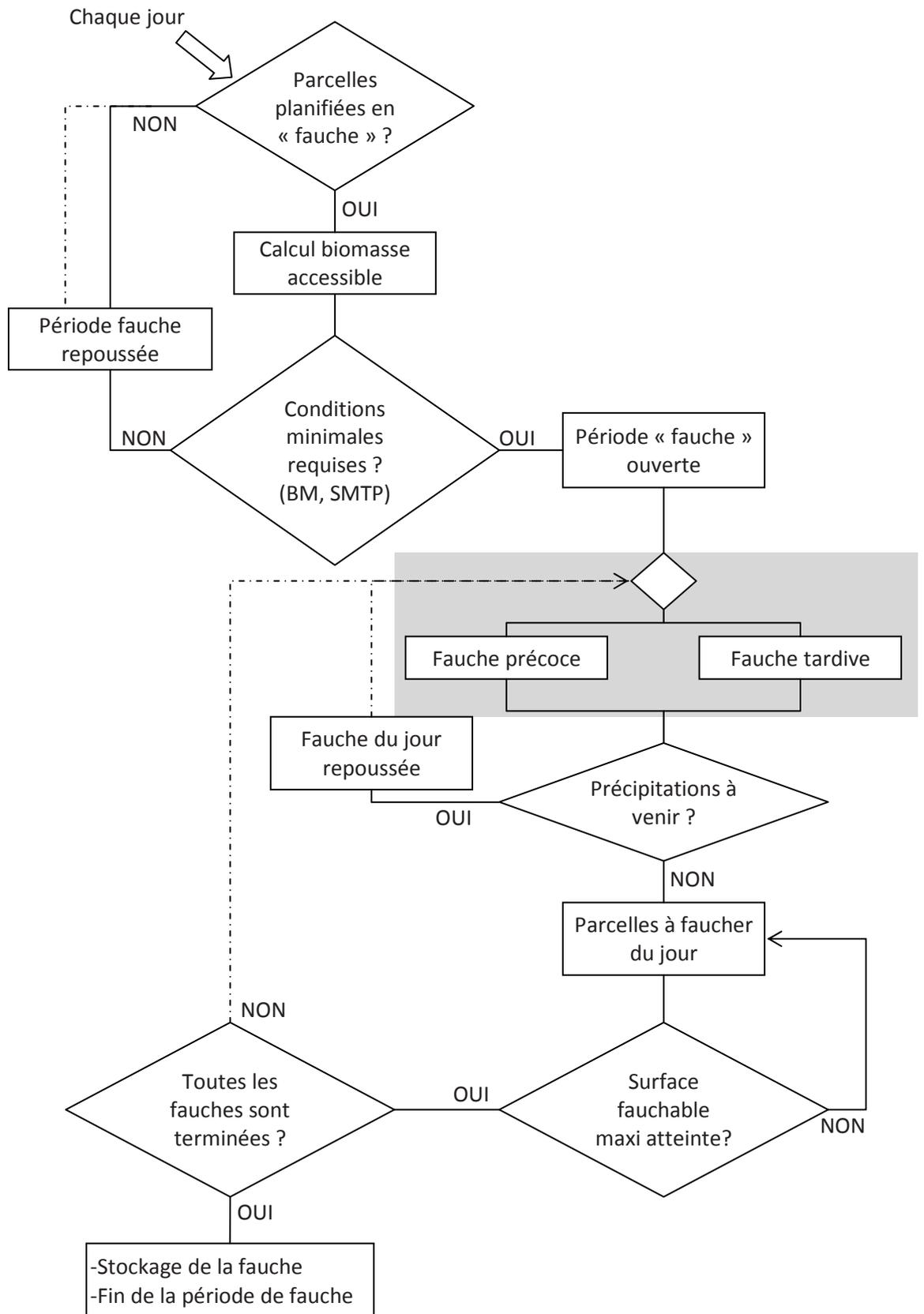


Figure 1 : Algorithme décisionnel pour le déclenchement de la fauche : cas de la fauche première coupe avec des règles spécifiques (carré gris) pour représenter la possibilité de récolter précocement ou tardivement. Les pointillés représentent le retour à l'étape de l'algorithme qui sera activée le jour d'après.

Les parcelles prêtes à être fauchées ne le sont que dans la limite d'une surface maximale fauchable, paramétrée pour rendre compte du dimensionnement des outils d'une exploitation. Cette surface est définie par un pourcentage de la SAU, par exemple 10% de 80 ha de SAU. Les parcelles sont ainsi fauchées dans l'ordre établi sur la liste « à faucher ».

Pour certaines saisons, paramétrables au choix, si les conditions météo n'ont pas été favorables au cours de la saison de fauche donnée, les fauches sont réalisées de manière obligatoire, en dépit des règles de décision décrites précédemment.

◆ L'arrêt des fauches

La pratique de la fauche est arrêtée selon l'une des trois conditions suivantes :

- i) Tout d'abord, si la liste des parcelles « à faucher » est vide. Cela signifie que toutes les parcelles planifiées sur une saison-pratique ont été fauchées et que le simulateur peut engager la planification de la saison-pratique suivante
- ii) Si les conditions météo ou de croissance de l'herbe n'ont pas permis à la fauche de se réaliser, au-delà d'une date butoir. Les fauches sont alors réalisées obligatoirement si c'est planifié ainsi, ou abandonnées
- iii) Les fauches de l'année s'arrêtent au-delà d'une date maximale paramétrable, par exemple le 25 octobre (jour 299)

Un exemple de fonctionnement

La Figure 2 illustre un exemple d'une parcelle dont la biomasse cumulée au ras du sol est calculée chaque jour par Dynamilk et subit trois séquences de coupes par an. La date de la 1^{ère} coupe est variable d'une année sur l'autre, au contraire de la 2^{ème} coupe, réalisée pour les deux années, le 2 Août, soit le premier jour de la saison-pratique «été ». Ainsi, dès que la saison-pratique « été » est enclenchée, les conditions de fauche sont favorables. Sur la Figure 2, au regard de la biomasse au ras du sol sur la saison automne, supérieure à la biomasse récoltée en 3^{ème} coupe, nous pouvons conclure qu'un affinement du paramétrage des règles de décision déclenchant la coupe en automne permettrait d'améliorer considérablement le rendement et, ainsi, de profiter de la repousse d'herbe en automne, si tant est que la météo le permet.

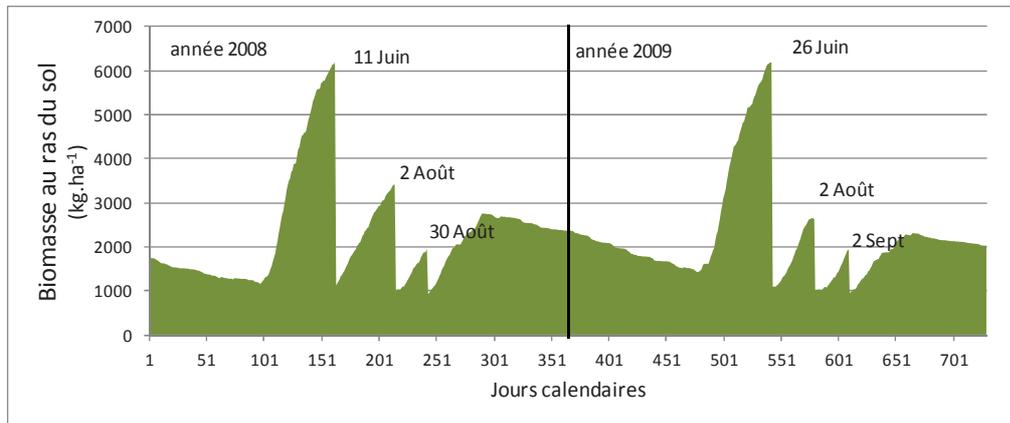


Figure 2: Biomasse au ras du sol d'une parcelle de type « fauche riche », soit selon la typologie développée par Jouven *et al.*, (2007) une composition de A 40%, B 40%, C 20% et D 0% sur deux années consécutives (2008 et 2009). Trois fauches sont planifiées sur cette parcelle, toutes pour récolter du foin ou des regains séchés au sol. Selon l'année, les dates de réalisation des fauches varient en fonction des conditions de croissance de l'herbe et de la météo.

6.1.3.2 Gestion des stocks

Une fois que chaque parcelle est fauchée, un coefficient de perte entre la fauche et le stockage des fourrages est appliqué. Ce coefficient est paramétrable dans le scénario. Par exemple, selon le cas-type BL15, ce coefficient est estimé entre 5 et 10% selon le type de fourrages, l'ensilage d'herbe étant celui présentant le plus de perte (Dulphy, 1987).

Pour les fourrages ou foin de 1^{ère} coupe, les fourrages précoces ou tardifs ne sont pas discriminés en tant que tel. Cependant, un tri des fourrages selon leur qualité est effectué. Au sein de l'espace de stockage, deux catégories de foin de 1^{ère} coupe existent. Le fourrage de 1^{ère} coupe est réparti selon une proportion définie et paramétrée : soit dans la catégorie « foin de bonne qualité », soit dans celle de « qualité médiocre ». Ainsi chaque parcelle récoltée, dont on connaît le rendement et la digestibilité de son foin récolté, est triée selon sa densité énergétique. Dès lors, tous les foins des parcelles récoltées en 1^{ère} coupe sont triés sur leur densité énergétique pondérée en fonction du rendement.

Les regains de 2^{ème} et 3^{ème} coupe sont classés dans une même catégorie : les regains. La digestibilité de la totalité des regains est calculée selon une moyenne pondérée par les rendements de la digestibilité de chaque parcelle.

L'exploitation agricole se caractérise par une capacité maximale de stockage des fourrages, afin de rendre compte du dimensionnement des bâtiments. Cette capacité maximale est exprimée en t de MS par UGB. Cette capacité maximale est ensuite subdivisée selon les trois catégories de fourrages récoltés selon des rapports définis à partir de la composition de la ration de base (cf. paragraphe suivant). Ainsi au moment du stockage, la quantité à stocker est comparée à la quantité déjà stockée. Si la somme des deux est supérieure à la capacité maximale de stockage du fourrage désigné, l'excédent est automatiquement vendu. Cette compartimentation des stocks facilite la

gestion des stocks fourragers d'un point de vue informatique. Cependant, elle implique qu'au cours d'une année, il est possible de vendre un type de fourrage excédentaire et d'acheter simultanément un autre fourrage manquant. Cette simplification des règles de gestion n'est ainsi pas en adéquation avec les pratiques réelles des éleveurs qui préféreraient plutôt une gestion de report de stocks d'un lot à un autre.

6.1.3.3 Gestion de l'alimentation hivernale : allocation des fourrages et composition de la ration

Chaque type de fourrage est attribué aux différents lots d'animaux selon leurs caractéristiques et qualités (Figure 3). Cette allocation est effectuée en fonction des objectifs de production spécifiques des lots du troupeau laitier. Par conséquent, les vaches en lactation sont nourries à partir d'une ration de base composée d'un mélange de foin de 1^{ère} coupe « bonne qualité » et de regains. Les vaches tarées sont nourries avec un mélange de foin de « qualité médiocre » et de regains. La ration de base des génisses est composée uniquement de foin de « qualité médiocre ». Les proportions entre foin de 1^{ère} coupe et regains sont paramétrables pour les vaches en lactation et les vaches tarées.

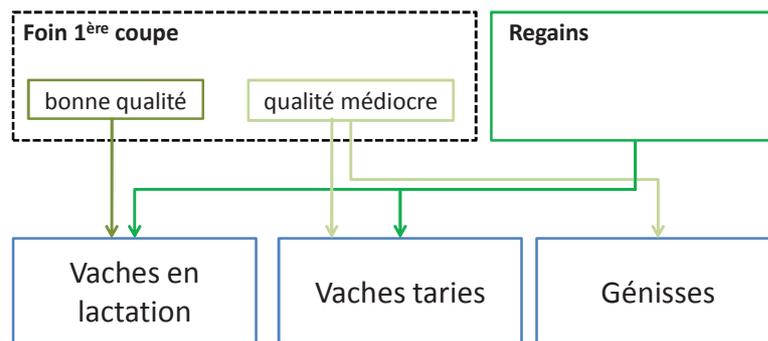


Figure 3 : Allocations des différentes catégories des fourrages aux lots du troupeau laitier

Comme nous l'avons abordé dans le chapitre 5, l'ingestion des vaches en lactation est basée sur le principe de la saturation de la capacité d'ingestion. Les apports d'aliments concentrés sont calculés chaque jour. L'utilisation d'une proportion fixe d'un mélange de fourrages nous permet alors de connaître la valeur énergétique et d'encombrement du mélange et, ainsi, de pouvoir calculer la quantité de mélange fourrager ingérée. La quantité ingérée de chaque type de fourrages est alors calculée *a posteriori*.

6.1.3.4 Gestion du pâturage

Gestion du temps de séjour sur les parcelles et des déplacements des lots

La gestion du pâturage doit être faite de façon à maximiser l'ingestion d'herbe par les animaux tout en ne pénalisant pas la croissance de l'herbe sur la parcelle après le passage des animaux (Guerin et Agreil, 2007). Or, l'offre herbagère au pâturage est

caractérisée par sa fluctuation, en termes de quantité comme de qualité. Cette fluctuation s'opère au cours de la saison de pâturage : le printemps se caractérise par une pousse importante et de qualité, l'été, par un ralentissement de cette pousse, et l'automne, par une repousse plus ou moins importante selon les conditions climatiques. Mais cette fluctuation existe également au cours même du temps de séjour des animaux sur une parcelle. Le management du pâturage selon la technique du **pâturage tournant simplifié** a pour objectif de maintenir le couvert végétal dans un état de pleine croissance tout au long de la période de pâturage (Léger *et al.*, 2000) en maintenant une proportion de feuilles vertes importante dans le couvert végétal, assurant ainsi une herbe de qualité en quantité (Delagarde *et al.*, 2001, Peyraud et Delaby, 2005).

La gestion du déplacement des lots de parcelle en parcelle s'effectue en cohérence avec les règles du pâturage tournant simplifié, telles que Hoden *et al.* (1991) et Delaby *et al.* (2001) les ont décrites. Le temps de séjour est donc fonction de l'offre herbagère et du niveau de production des animaux (besoins, apports de concentrés, chargement). Selon la méthode développée par Hoden *et al.*, (1991), le changement de parcelle est déclenché lorsque la quantité de lait du jour a diminué de X% par rapport à la quantité maximale atteinte sur la parcelle, comme l'illustre la Figure 4 (le « X »% étant paramétrable en fonction d'une gestion de pâturage plus ou moins sévère)

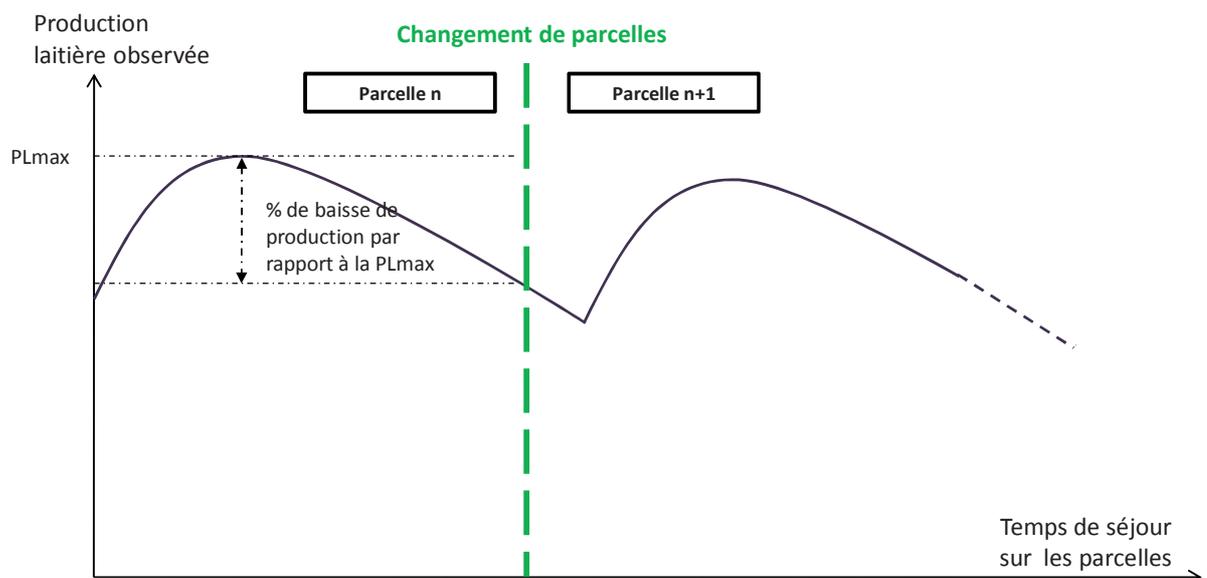


Figure 4 : Gestion du déplacement d'un lot de vaches en lactation d'une parcelle à l'autre selon la technique du pâturage tournant simplifié

Pour mettre en place cette gestion, nous avons repris les équations du logiciel Patur'In développées par Delaby *et al.*, (2001). Ce modèle mathématique permet de calculer la hauteur de sortie objectif (H_{Sobj}) en fonction de la hauteur d'herbe en entrée (H_E) de la parcelle, H_{Sobj} correspondant à la baisse voulue de production laitière par rapport à la production laitière maximale atteinte sur la parcelle. Ce modèle mathématique permet également de prendre en compte l'intensité de valorisation de l'herbe à travers trois niveaux : pâturage normal, sévère ou libéral. Ce niveau d'intensité

est le reflet de la stratégie de l'éleveur. En effet, si un éleveur préfère optimiser l'utilisation de l'herbe au pâturage, les animaux pâtureront plus longtemps et plus ras que lors d'une stratégie « normale » en acceptant une baisse de production laitière plus importante. *A contrario*, un éleveur privilégiant la production laitière au pâturage préférera assurer une herbe de qualité en quantité non limitante et déclenchera plus tôt le changement de parcelle.

Comme expliqué dans le chapitre 5, le modèle d'ingestion et de production laitière implémenté dans Dynamilk calcule la production laitière du jour comme étant le résultat de l'énergie ingérée durant les deux jours précédents. Les baisses de production laitière déclenchant la sortie de parcelle associées à la stratégie de l'éleveur sont décrites dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Pratiques de pâturage implémentées dans Dynamilk et leur incidence sur la baisse de production laitière acceptée au cours du temps de séjour sur la parcelle

	Sévère	Normale	Libérale
Baisse de production laitière associée dans Dynamilk (calcul sur deux jours)	85%	87%	90%

Ce mode de gestion des déplacements de parcelle en parcelle, spécifique des animaux en lactation, a également été adopté pour les autres lots du troupeau laitier, à savoir, les vaches tarées et les génisses, par soucis de simplification des règles implémentées dans Dynamilk. En effet, l'équation calcule la hauteur de sortie objectif en fonction de la hauteur d'herbe en entrée de la parcelle. Elle est donc indépendante de la production laitière, même si elle reste construite pour être cohérente avec la chute de production laitière au cours du séjour.

Le déplacement des lots de parcelle en parcelle est, de plus, géré par un temps de séjour maximum, paramétrable selon les lots.

Outre la planification possible des parcelles à pâturer pour un lot spécifique, le déplacement géographique des lots de parcelle en parcelle ne s'effectue pour l'instant que selon les critères de hauteur d'herbe (une hauteur d'herbe minimale et la parcelle ayant la hauteur d'herbe la plus importante sera privilégiée par rapport aux autres) et l'ordre implémenté des parcelles dans le fichier d'entrée.

Gestion des transitions et des périodes de manque d'herbe

Par souci de simplification, le simulateur ne prend pas en compte une période de transition au moment de la mise à l'herbe ou de la rentrée étable des animaux.

Lorsqu'un manque d'herbe pâturable se produit, et qu'aucune parcelle ne permet d'alimenter les animaux, ces derniers sont alors alimentés avec des fourrages conservés tout en étant encore au pâturage. Dans ce cas-là, nous considérons qu'ils ne pâturent plus. Cette situation est déclenchée par le fait qu'aucune parcelle planifiée « pâture » ne dispose d'une biomasse ou d'une hauteur d'herbe suffisante pour accueillir un lot (biomasse de 1 t MS.ha⁻¹ ou 8 cm de hauteur d'herbe compressée, seuils paramétrables). Le lot reste alors sur la parcelle et l'ingestion est pilotée selon le modèle

développé pour l'alimentation en stabulation. Cependant, vu que les animaux sont toujours sur la parcelle, les besoins d'entretien prennent en compte l'indice d'activité spécifique du pâturage. Ainsi, la quantité de fourrages consommés lors de la période de pâturage est un bon indicateur de la sensibilité du système de production au manque d'herbe.

6.1.3.5 Conclusion sur le module décisionnel

L'ensemble des éléments de stratégie et des règles de décisions de pilotage des principales pratiques du système de production, est défini et paramétrable. Cette construction du modèle nous autorise une grande souplesse de paramétrage qui nous permet de simuler de nombreuses situations comme par exemple un éleveur préférant:

- assurer un stock fourrager, éventuellement au détriment de la qualité des fourrages
- ne pas pénaliser la production laitière par un pâturage plus libéral
- mieux valoriser la pousse de l'herbe en acceptant une plus grande variation de la production laitière avec un pâturage plus strict

Le fichier scénario incluant tous ces paramétrages est présenté en annexe 2 de cette thèse.

6.2 Illustration du fonctionnement du simulateur et validation à l'échelle système

Pour illustrer le fonctionnement des règles de décision qui régissent le fonctionnement de Dynamilk et vérifier leur cohérence, nous avons simulé deux situations :

- ◆ Le cas-type BL15, présenté dans les référentiels animal et fourrager développés par les Réseaux d'Élevage (Reuillon, 2011)
- ◆ Une exploitation synthétique créée à partir de données d'enquêtes en exploitations réalisées dans quatre exploitations laitières herbagères situées dans la zone AOP saint-nectaire élargie, ayant pour caractéristique principale de concentrer les vêlages sur l'automne et le début de l'hiver. Cette situation a été choisie pour sa représentativité au sein des systèmes herbagers de la zone AOP saint-nectaire (Jacquot *et al.*, 2010)

A partir des données descriptives du système de production BL15 et des données récoltées au cours des enquêtes, nous avons paramétré les deux systèmes à simuler. Nous avons ensuite confronté les résultats aux ordres de grandeurs présentés dans le BL15 et les résultats des enquêtes (bilans fourragers, rendements, qualité des fourrages, consommation des fourrages par le troupeau...).

6.2.1 Description des systèmes et paramétrage de la simulation

6.2.1.1 Le système BL15

Les cas-types et les référentiels sont établis à partir de suivis des pratiques existantes sur des fermes appartenant aux Réseaux d'Élevage. Les données de ces référentiels sont actualisées régulièrement (Reuillon, 2008 et 2011).

Le cas-type **BL15** se situe dans la zone fourragère « volcanique tout herbe » caractérisée par une altitude comprise entre 800 et 1000m. Les précipitations sont abondantes, assurant une pousse de l'herbe régulière et continue au cours de la saison de pâturage. Les prairies sont majoritairement des prairies permanentes.

Ce cas-type est représentatif des systèmes reposant sur l'herbe récoltée sous forme d'ensilage préfané, de foin séché au sol et de regains. La période hivernale étant importante et la période de vêlages principalement concentrés sur l'automne et l'hiver, le système de production se doit d'assurer des stocks fourragers importants. Ainsi, sur une surface agricole utile de 72 ha, 55% de la surface est consacrée à la récolte de fourrages en première coupe, soit 39.9 ha. Plus de la moitié de cette surface est destinée à la récolte d'ensilage d'herbe. 54% de la surface en première coupe est ensuite fauchée de nouveau afin de constituer les stocks de regains. Les prairies

réservées au pâturage des vaches laitières en lactation occupent 22.9% de la SAU, soit 16.5 ha et 33 ares par animal. Le reste des prairies est destiné au pâturage des génisses et des vaches taries, à raison de 21.7%. Nous avons ainsi pu paramétrer le fichier descriptif du parcellaire de façon à reproduire fidèlement ce cas-type, comme le montre la Figure 5.

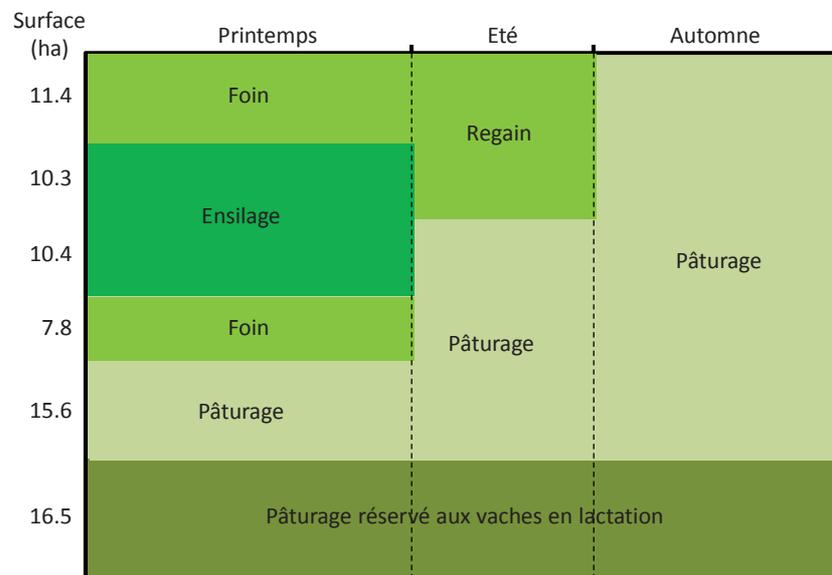


Figure 5 : Présentation du parcellaire « BL15 » construit à partir des données du cas-type BL15

La taille du troupeau laitier constitutif du cas-type **BL15** est de 47 vaches laitières en lactation (effectif global à l'année) pour 71 UGB totaux. Le taux de renouvellement est de 30% avec un âge au premier vêlage pour moitié à 2 ans et le reste à 3 ans. Le troupeau est de race pure prim'holstein, avec une production réelle de 6660 litres par vache et par an, pour un quota d'environ 300 000 litres par campagne. Les vêlages se déroulent principalement d'août à décembre, bien que certains puissent avoir lieu tout au long de l'année. La ration hivernale des vaches laitières est composée d'ensilage préfané, de foin de première coupe et de regains. La quantité de concentrés apportée est estimée à 210g.l⁻¹.

Nous avons paramétré le troupeau laitier selon ces données en effectuant toutefois quelques simplifications. Ainsi, nous avons fixé l'âge au premier vêlage à 3 ans. La répartition des vêlages s'étale d'août à début février avec un pic de septembre à novembre. La ration de base hivernale est composée d'un mélange de 70% de foin de bonne qualité (ensilage et foin de 1^{ère} coupe de meilleure qualité) et de 30% de regains. Nous avons ajusté l'apport de concentrés à 200g.l⁻¹. En effet, le système de rationnement des animaux ne prend pas en compte la perte d'aliments à l'auge. Nous avons donc diminué légèrement les apports de concentrés par rapport à la réalité.

6.2.1.2 Le système « groupé autonome »

Le système « groupé autonome » (**GA**) a été élaboré à partir des données descriptives des performances du troupeau du contrôle laitier (production laitière, saisonnalité des vêlages, taux de renouvellement, taux de réforme, âge au premier vêlage, effectifs des animaux...) et des données recueillies lors des enquêtes sur quatre exploitations (caractéristiques des parcelles et pratiques appliquées à chaque parcelle, gestion du troupeau, de ses performances et de la stratégie de reproduction de l'éleveur appliqué à son troupeau).

Ces systèmes présentent les mêmes caractéristiques pédoclimatiques que le cas-type **BL15** « volcanique tout herbe » avec une altitude moyenne de 880m, des précipitations régulières et une majorité de prairies permanentes dans la surface agricole utile.

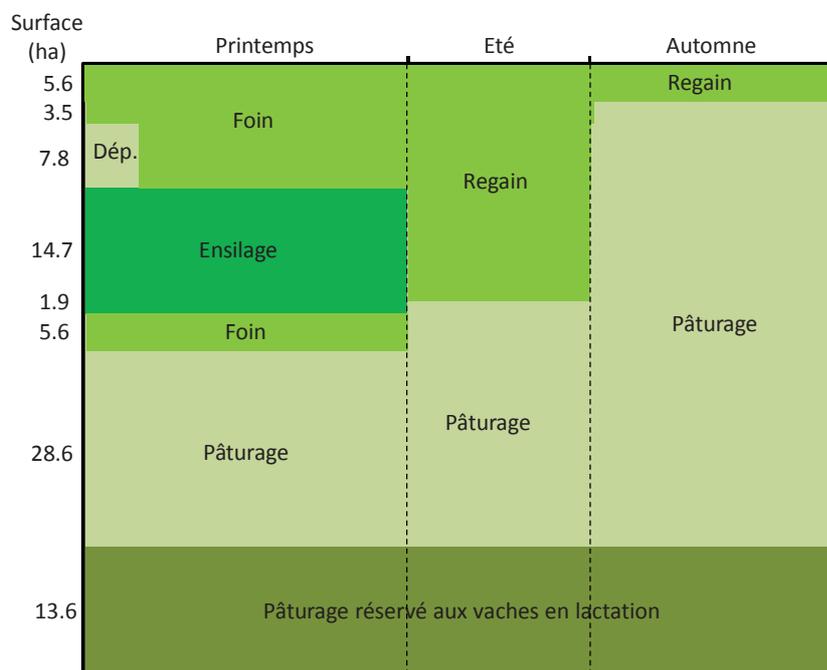


Figure 6 : Présentation du parcellaire « GA » construit à partir des données d'enquêtes en exploitation

De la même manière que le système décrit par le **BL15**, les besoins en stocks fourragers sont importants. Ainsi, sur une **SAU** de 81.4 ha, 48% est fauchée en 1^{ère} coupe, soit 39.1 ha. 80% de cette surface est ensuite consacrée aux 2^{èmes} coupes afin de constituer les stocks de regains (31.6 ha). Quand la disponibilité en herbe est suffisante et les conditions climatiques bonnes, une 3^{ème} coupe est pratiquée sur les parcelles qui ne peuvent pas être pâturées. Le déprimage est pratiqué sur certaines parcelles récoltées en foin séché au sol (7.8ha). Une large partie des 1^{ères} coupes est consacrée à la récolte d'ensilage d'herbe préfanée ou d'enrubannage (41% des surfaces fauchées, soit 16.6ha). 52% de la SAU est ainsi consacrée uniquement au pâturage (42.2ha) dont 13.6 ha réservée aux pâtures des vaches laitières et 28.6 ha pour le reste du troupeau.

Les vaches en lactation disposent donc de 27 ares par animal au printemps. Selon ces indications, nous avons pu constituer le parcellaire, matérialisé sur la Figure 6.

Le troupeau est constitué de 50 vaches laitières ayant une production moyenne réalisée de 7039 litres par lactation pour un quota de 340 000 litres par campagne. L'âge du premier vêlage est, en moyenne, de 32 mois avec un taux de renouvellement de 31%. Les vêlages s'étalent de fin août à début mars, avec un pic de septembre à début décembre. La ration de base des vaches en lactation est composée en moyenne d'un mélange d'ensilage d'herbe, de foin de 1^{ère} coupe et de regains. Cependant, cette composition est variable selon le stade de lactation. En effet, certaines exploitations de notre échantillon substituent progressivement l'ensilage au profit du foin de 1^{ère} coupe lors de la deuxième partie de lactation. Les animaux sont également complétés à partir d'une composition variable en qualité et en quantité selon les exploitations. Pour certaines exploitations, l'apport en aliments concentrés diffère en fonction du stade de lactation (de 500g à 4,5 kg.VLL⁻¹.j⁻¹ par exemple).

Nous avons ainsi paramétré le troupeau laitier sur la base de 50 vaches laitières avec un potentiel de production de 7000 litres par lactation. L'âge au premier vêlage est de 3 ans avec un taux de renouvellement de 31%. La distribution des vêlages suit strictement la répartition moyenne des quatre exploitations étudiées. Comme dans le cas de la simulation BL15, la ration de base des vaches en lactation est composée de 70% de foin de bonne qualité et de 30% de regains. Nous avons choisi de compléter les vaches en lactation à hauteur de 1200 kg par animal et par an, soit 170 g.l⁻¹.

6.2.2 Etude comparative entre les données des systèmes étudiés et les données simulées

Nous avons simulé le système décrit par le **BL15** ainsi que le système **GA** avec les résultats prédits par Dynamilk. Nous avons effectué pour chacun de ces systèmes deux simulations sur deux séries climatiques différentes d'une longueur de cinq années : une série climatique de 1993 à 1997 et une de 2005 à 2010. La période 1993 à 1997 est une série climatique ne présentant pas d'évènements climatiques majeurs, à l'exception de l'été sec de 1994. Nous avons testé également la série 2005 à 2010, plus contemporaine mais présentant plus d'aléas (Météofrance), perturbant la pousse de l'herbe :

- ◆ été 2005 : épisode caniculaire accompagné d'un déficit pluviométrique très net
- ◆ été 2006 : un épisode caniculaire important
- ◆ 2009 : année marquée par d'importants déficits hydriques

Les séries climatiques proviennent de la station météo de Marcenat (Massif central), située à une altitude de 1060 m. Tous les résultats présentés dans cette partie sont des moyennes effectuées pour chaque variable choisie sur les deux séries de cinq années.

6.2.2.1 Le système cas-type BL15

Nous avons ainsi comparé les données concernant la production fourragère (rendements, dates des récoltes, qualité des fourrages), les stocks fourragers, les niveaux de production laitière et d'ingestion des animaux du cas-type BL15 avec les résultats simulés par Dynamilk.

◆ Production laitière

Les productions laitières simulées sont en adéquation avec les productions par vaches laitières annoncées par les données du BL15, à savoir 6600 litres de lait par animal et par campagne (période 1993-1997 : 6663 l.VLL⁻¹; période 2005-2010 : 6636 l.VLL⁻¹).

Nous pouvons noter que la saisonnalité de la production laitière n'est pas identique entre les données du cas-type et les deux séries simulées. Ce phénomène est principalement dû à la répartition des vêlages au cours de l'année. En effet, dans le cas-type BL15, les vêlages sont concentrés entre août et début janvier, mais quelques vêlages persistent toute l'année. Or, avec Dynamilk nous avons étalé les vêlages uniquement d'août à septembre pour suivre les contraintes de construction du simulateur. La production laitière simulée est ainsi principalement inférieure en juin, juillet et septembre puisque le nombre d'animaux en tarissement est plus important dans les cas simulés que dans la réalité. Nous pouvons également noter que les productions laitières mensuelles réalisées sont très peu variables entre les deux séries climatiques réalisées. Les écarts les plus importants se situent en juin et juillet, périodes où la pousse de l'herbe est plus sensible à la sécheresse.

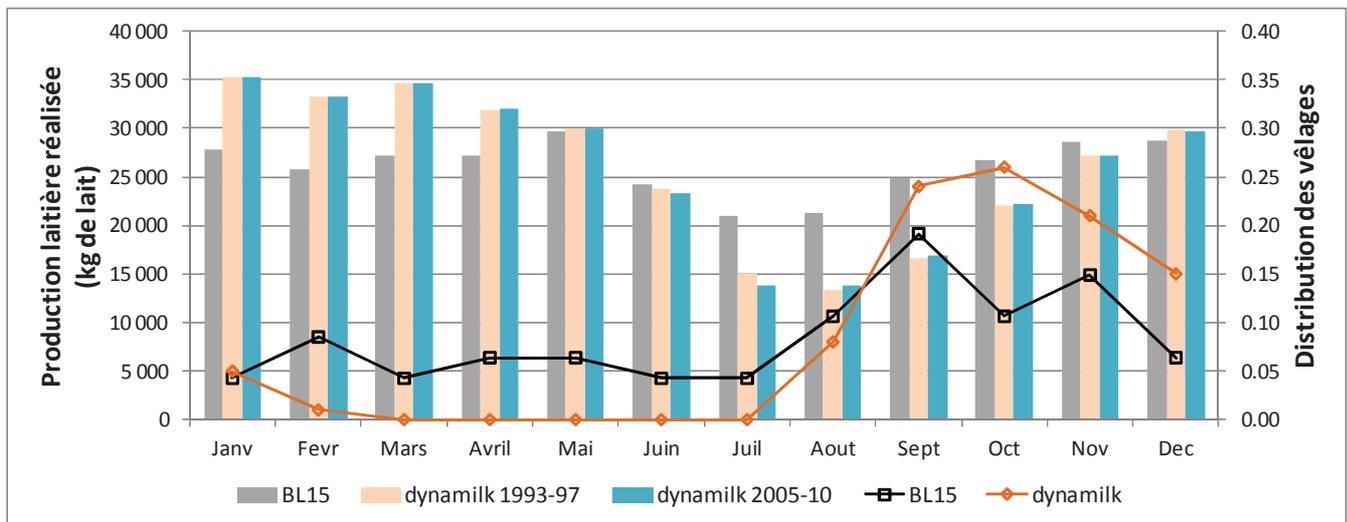


Figure 7 : comparaison des productions laitières mensuelles réalisées entre les valeurs du BL15 et les valeurs modélisées de Dynamilk (histogrammes pour la production laitière et courbes pour la distribution des vêlages)

◆ Production fourragère et stockage

Tableau 2: données comparatives de la production fourragère et du stockage du cas-type BL15

	BL15	Dynamilk	
		1993 à 1997	2005 à 2010
Dates de récolte			
Ensilage (foin précoce)	10 avril- 1 ^{er} juillet	5 juin (25mai – 10 juin)	4 juin (19 mai – 12 juin)
Foin 1 ^{ère} coupe (foin tardif)	1 ^{er} juillet – 20 août	4 juillet (30juin – 7 juillet)	27 juin (11 juin – 5 juillet)
Regain	20 août – 10 sept	9 août (2 août – 25 août)	22 août (2 août – 10 sept)
Rendements (TMS.ha⁻¹)			
Ensilage (foin précoce)	3.6	3.8 (3.6 – 4.4)	3.7 (3 – 4.4)
Foin 1 ^{ère} coupe (foin tardif)	4	4.5 (4.1 – 5)	3.5 (2.3 – 4.7)
Regain	2,5	1.7 (1.4 – 2)	1.5 (0.7 – 2)
Stocks			
Quantité totale (T MS.UGB ⁻¹)	2.9	2.9 (2.8 – 3.1)	2.5 (1.9 – 3.1)
Bilan fourrager (mise à l'herbe)	-	0.35 (0.03 – 0.57)	0.07 (-0.44 – 0.62)

Aux vues des résultats de simulation, les règles mises en place pour gérer la récolte des fourrages permettent de faucher en temps voulu. En effet, les dates moyennes de la première fauche, ensilage et foin séché au sol, sont comparables à celles déclarées dans le cas-type BL15. Cependant, les 2^{èmes} coupes s'effectuent en moyenne

très tôt pour la série climatique 1993-1997 et sont plus tardives pour la série 2005-2010. Les rendements des premières coupes sont comparables à ceux du cas-type BL15 (3.8 ou 3.7 contre 3.6 t MS.ha⁻¹ en coupe précoce et 4.5 ou 3.5 contre 4 t MS.ha⁻¹ en 1^{ère} coupe sèche). Nous pouvons noter cependant que les rendements en 1^{ère} coupe sèche sur la période 2005-2010 sont moindres avec seulement 3.5 t MS.ha⁻¹. Les rendements en 2^{ème} coupe sont inférieurs à ceux annoncés dans le cas-type BL15 (2.5 t MS.ha⁻¹) avec 1.7 t MS.ha⁻¹ en moyenne pour la période 1993-1997 et 1.5 t MS.ha⁻¹ pour la période 2005-2010, soit 1 t MS.ha⁻¹ en moins. Ce moindre rendement des regains peut s'expliquer par la sensibilité du module de croissance de l'herbe à la sécheresse (Baumont *et al.*, 2008). Or, la période 2005 à 2010 présente plusieurs épisodes de déficit pluviométrique important, notamment les années 2005 et 2009 (Météofrance). Ce rendement plus faible implique que la quantité totale des fourrages récoltés soit inférieure à celle du cas-type et de la période 1993-1997 avec seulement 2.5 t MS.UGB⁻¹ (Tableau 2). En effet, les rendements en 2^{ème} coupe n'ont pas été compensés par ceux de 1^{ère} coupe comme pour la période 1993-1997. La quantité totale en moyenne stockée sur la période 2005 à 2011 est légèrement inférieure à la quantité totale consommée par les animaux (Tableau 2), confirmée par le bilan fourrager calculé lors de la mise à l'herbe. Cette simulation indique ainsi que le système fourrager pourrait être sensible aux années de déficits hydriques importants pouvant compromettre l'autonomie fourragère du système. En effet, le bilan fourrager à la mise à l'herbe est légèrement positif sur cette période avec deux années négatives à -0.44 T MS.UGB⁻¹.

Le cas-type BL15 ne nous donne pas le bilan fourrager puisqu'il est justement construit de façon à ce que ce dernier soit à l'équilibre. Cependant, puisque Dynamilk donne le bilan fourrager de chaque année, nous pouvons voir qu'il est globalement à l'équilibre sur les années 2005-2011, mais avec des années négatives. Dynamilk permet ainsi de montrer la différence entre les séries climatiques 1993-1997 et 2005-2011, puisque le bilan fourrager du BL15 était systématiquement positif sur la première période simulée. Un même système disposait donc d'une marge fourragère importante dans les années 1990 qui a disparue dans les années 2000.

◆ **Composition de la ration de base et biomasse ingérée**

Tableau 3 : données comparatives de la composition de la ration de base et de la biomasse ingérée par les vaches en lactation du cas-type BL15

	BL15	Dynamilk	
		1993 à 1997	2005 à 2010
<i>Valeurs énergétiques des fourrages de base et de l'herbe consommée (UFL)</i>			
Ensilage (foin « bonne qualité »)	0.82	0.82 (0.81 – 0.83)	0.80 (0.76 – 0.83)
Foin séché sol (foin « moins bonne qualité »)	0.72	0.73 (0.72 – 0.73)	0.69 (0.68 – 0.69)
Regain	0.75	0.77 (0.73 – 0.82)	0.80 (0.75 – 0.83)
Herbe ingérée	-	0.84 (0.83 – 0.86)	0.83 (0.78 – 0.86)
<i>Fourrages et herbe consommés</i>			
Fourrages totaux (T MS.UGB-1)	2.67	2.69 (2.57 – 3.02)	2.62 (2.50 – 2.74)
Ration de base moyenne (kg MS.j-1)	15.0	15.5 (15.4 – 15.6)	15.5 (15.3 – 15.8)
Herbe ingérée (kg MS.j-1)	-	13.3 (12.9 – 13.7)	12.9 (11.6 – 13.3)

Comme l'indique le Tableau 3, les valeurs simulées des fourrages récoltés sont comparables aux valeurs annoncées par le cas-type BL15 avec toutefois des valeurs légèrement inférieures pour les fourrages issus de la 1^{ère} coupe pour la série climatique 2005-2010 (0.80 UFL pour les ensilages contre 0.82 et 0.69 UFL pour les foins séchés au sol contre 0.72). La valeur moyenne UFL des regains de la période 2005-2011 est supérieure aux deux autres avec 0.83 contre 0.75 et 0.77. Cette valeur est cependant plus proche de celle énoncée par les tables des valeurs alimentaires de l'INRA pour les prairies permanentes de moyenne montagne (Baumont *et al.*, 2007).

En moyenne, les animaux du troupeau consomment autant de fourrages conservés que les valeurs indiquées par le cas-type du BL15, soit respectivement 2.69 et 2.62 T MS.UGB⁻¹ pour les deux périodes simulées contre 2.67 T MS.UGB⁻¹. L'ingestion de fourrages conservés lors de la période hivernale par les vaches en lactation est également comparable à la réalité avec en moyenne 15.5 kg MS.VLL⁻¹.j⁻¹.

Le cas-type BL15 ne fournit pas certaines données sur le pâturage telles que les niveaux d'ingestion journalière d'herbe ou la valeur énergétique de l'herbe ingérée. En effet, ces données sont difficilement accessibles hors des expérimentations. L'ingestion d'herbe au pâturage des vaches laitières (vaches en lactation et vaches tarées) selon Dynamilk est en moyenne de 13.3 et 12.9 kg MS.VL⁻¹.j⁻¹. Ce niveau d'ingestion plutôt faible *a priori* résulte du fait qu'au cours des saisons de pâturage, les vaches laitières présentes ont un stade de lactation différent avec une majorité d'animaux, soit en fin de lactation, soit en tarissement. Cependant, les valeurs prédites par Dynamilk correspondent aux données proposées par les tables de rationnement de l'INRA pour un système en pâturage tournant simplifié, compte-tenus des apports d'aliments concentrés (en moyenne 3.6 kg MS.VLL⁻¹.j⁻¹ lors de la saison de pâturage) et des taux de substitution associés (Delaby *et al.*, 2001, Faverdin *et al.*, 2007, Delagarde *et al.*, 2011). Néanmoins, nous pouvons noter que les règles de gestion du pâturage mises en place permettent d'assurer une qualité certaine de l'herbe ingérée puisque la valeur moyenne

de l'herbe ingérée au cours de la saison du pâturage est respectivement de 0.84 et 0.83 UFL pour les deux périodes simulées.

◆ Calendrier fourrager et de pâturage

La Figure 8 représente un exemple de toutes les pratiques effectuées sur l'ensemble des parcelles au cours de la saison de pâturage de l'année 1995. En visualisant le passage des lots et le temps de séjour sur les parcelles pâturées, nous pouvons remarquer que certaines prairies sont sous-utilisées. En effet, certaines parcelles ne sont pâturées qu'une seule fois au cours de la saison de pâturage, même certaines prairies réservées aux vaches en lactation. Certaines parcelles ne sont pas pâturées après la première coupe alors qu'elles étaient planifiées pour cet usage.

Ce calendrier indique, de ce fait, que le système BL15 sous-utiliserait les ressources herbagères au pâturage. Néanmoins, ces résultats des simulations doivent être nuancés par rapport à la gestion mathématique « parfaite » du pâturage, peu applicable dans la réalité par les éleveurs ainsi que par le fait que le contexte des années 1990 ne soit pas identique à celui des années 2000.

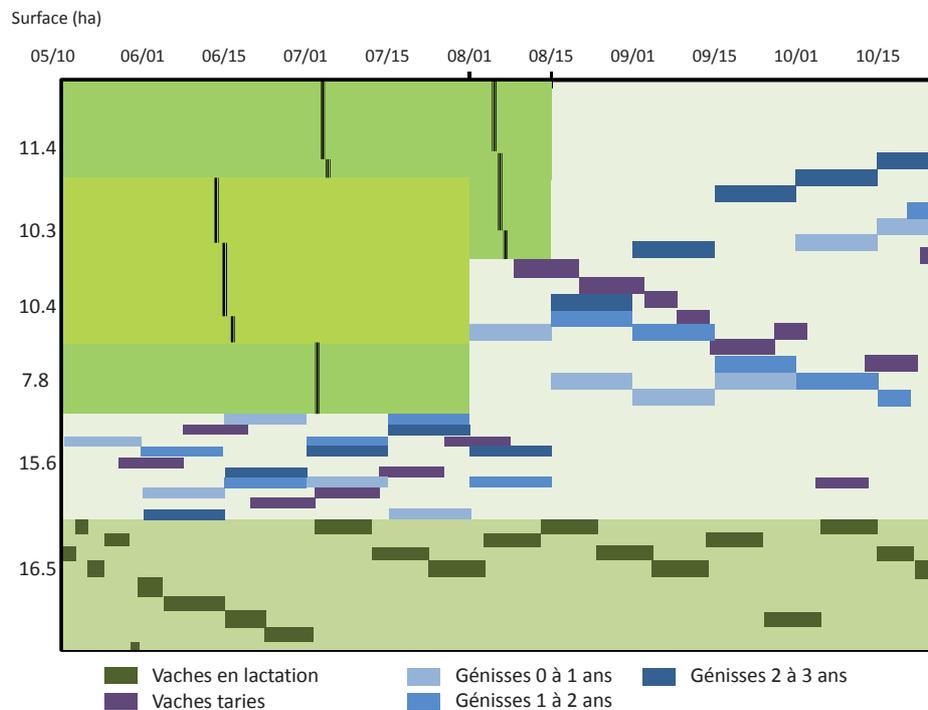


Figure 8 : Exemple du calendrier fourrager et de pâturage du parcellaire BL15 résumant toutes les pratiques ayant eu lieu au cours de l'année 1995 (les fauches sont symbolisées par un trait noir et les parcelles pâturées par un rectangle de couleur spécifique du lot pâturant et d'une longueur correspondant au temps de séjour)

6.2.2.2 Le système « groupé automne »

Nous avons également comparé les données simulées par Dynamilk avec les données récoltées lors des enquêtes en exploitation sur les paramètres de production.

Nous disposons ainsi de données des exploitations enquêtées pour l'année 2009 sur la gestion du système fourrager et les stocks constitués. Cependant, les informations

résultant des enquêtes en exploitation sont moins précises que les données du cas-type BL15 issues de suivis d'exploitation sur le long terme. Ceci est dû au fait que les agriculteurs ne savent pas automatiquement de façon détaillée les rendements associés à chaque type de coupe.

De prime abord, les dates de 1^{ères} fauches précoces sont effectuées dans une fourchette de temps similaire à celles des exploitations enquêtées (Tableau 4). Les fourrages séchés au sol, foin ou regains, sont récoltés plus tôt dans la saison que les dates prédites par Dynamilk, notamment pour les regains. Or, les informations obtenues lors des enquêtes sont celles de l'année 2009, année marquée par des mois de mai, juin et août très ensoleillés et secs, facilitant ainsi la fauche et la constitution de stocks. Les rendements proposés par Dynamilk sont globalement supérieurs à ceux obtenus en moyenne sur les exploitations enquêtées, à l'exception du rendement en regains. Ainsi, les systèmes simulés stockent une plus grande quantité de fourrages récoltés par UGB avec respectivement pour les deux périodes simulées 3.5 T MS.UGB⁻¹ contre 3.2 T MS.UGB⁻¹ pour les enquêtes.

Tableau 4 : données comparatives de la production fourragère et du stockage du système "groupé automne"

	GA	Dynamilk	
		1993 à 1997	2005 à 2010
Dates de récolte			
Ensilage (foin précoce)	21 mai – 6 juin	5 juin (25 mai – 10 juin)	4 juin (19 mai – 10 juin)
Foin 1 ^{ère} coupe (foin tardif)	5 – 25 juin	4 juillet (30 juin – 7 juillet)	27 juin (11 juin – 5 juillet)
Regain	3 juillet – 9 août	4 août (2 août – 2 sept)	15 août (2 août – 20 oct)
Rendements (TMS.ha⁻¹)			
Ensilage (foin précoce)	3.4	4.5 (4.1 – 5.1)	4.3 (3.5 – 4.9)
Foin 1 ^{ère} coupe (foin tardif)	3.8	5.0 (4.6 – 5.4)	3.9 (2.9 – 5.2)
Regain	2.1	2.0 (1.4 – 2.5)	1.8 (0.9 – 2.7)
Stocks (TMS.UGB⁻¹)			
Quantité totale	3.2	3.5 (3.1 – 4.1)	3.5 (2.3 – 3.8)
Bilan fourrager (effectué lors de la mise à l'herbe)	-	0.75 (0.49 – 0.82)	-0.03 (-0.24 – 0.23)

Nous ne disposons pas d'informations sur la valeur alimentaire des fourrages récoltés des exploitations enquêtées, ni sur la consommation de fourrages par les animaux du troupeau laitier. Cependant, nous savons que les exploitations enquêtées ont en moyenne un bilan fourrager équilibré pour les années « normales » mais qu'elles ont toutes eu recours à l'achat de fourrages lors des années difficiles comme 2003.

Par manque de données issues des enquêtes, nous ne pouvons comparer les valeurs alimentaires et les niveaux de consommation des fourrages qu'avec les données du cas-type BL15. Cependant, les systèmes de production des exploitations enquêtées ne sont pas diamétralement opposés puisqu'elles se situent dans la même zone

géographique et présentent quasiment la même distribution des vêlages. Toutefois, les exploitations formant le groupe « GA » présentent un niveau de production par animal plus important (7000 litres par lactation pour un chargement et une production laitière ramenée à la surface fourragère quasiment identique) et un rapport surface consacrée à la 1^{ère} coupe sur la surface totale moindre par rapport au BL15 (48 contre 55%). Ainsi, les valeurs énergétiques prédites des fourrages récoltés présentent les mêmes ordres de grandeurs que celles du BL15. Cependant, les foin sèches au sol sont de bien moindre qualité avec respectivement 0.71 et 0.67 UFL en moyenne pour les deux périodes simulées, certainement dû à la grande sensibilité du module de croissance de l'herbe aux périodes de déficit hydrique important, notamment pour la série climatique 2005-2010. Les valeurs énergétiques de l'herbe ingérée sont identiques avec en moyenne 0.84 et 0.83 UFL. De même, les niveaux d'ingestion de biomasse, que ce soit en stabulation ou au pâturage, sont comparables avec le cas-type simulé BL15.

La Figure 9 présente la production laitière mensuelle moyenne sur les deux périodes simulées que nous ne pouvons pas comparer à la production des exploitations enquêtées par manque de données. La production moyenne annuelle est de 7040 litres par animal pour les exploitations appartenant au système « GA ». Les productions laitières simulées sont respectivement de 6766 et 6780 pour les périodes 1993 à 1997 et 2005 à 2010, avec un troupeau et un parcellaire strictement identiques. Il y a donc peu de différences entre les deux séries climatiques simulées. Seuls les mois au pâturage diffèrent légèrement, différence directement imputable à la variabilité de la pousse de l'herbe entre les deux séries climatiques, et plus particulièrement due à un manque d'herbe à pâturer lors des étés 2005 et 2006. Ainsi, au cours de l'été de ces deux années, les vaches en lactation ont reçu en moyenne 3t de fourrages conservés. Dans cette situation, les apports d'une ration de type hivernal sont plus stables et maîtrisés que sur une parcelle dont la croissance du couvert herbacé est perturbée par les conditions climatiques. La production laitière réalisée est alors plus importante. En contrepartie, la consommation de fourrages conservés au pâturage modifie le bilan fourrager de l'année en cours.

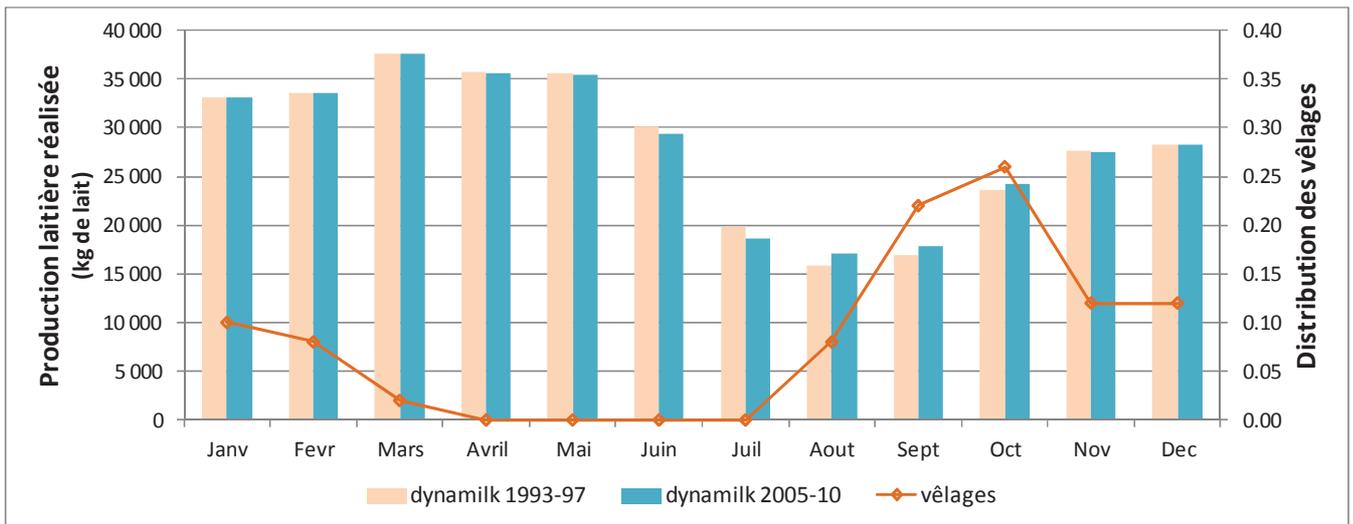


Figure 9 : Niveaux de production laitière mensuelle du système "groupé automne" simulés sur deux périodes : 1993-1977 et 2005-2010

6.2.2.3 Conclusion

Dynamilk permet de simuler de façon cohérente et satisfaisante le fonctionnement du système de production d'une exploitation laitière herbagère, aussi bien en matière de récolte des fourrages, de gestion du système fourrager que du pâturage et des niveaux d'ingestion par le troupeau.

L'étude de deux séries climatiques permet également de conclure que Dynamilk prend en compte l'impact des conditions climatiques sur le système fourrager (les rendements et la qualité des fourrages et du couvert herbacé), sur la production laitière, et sur l'autonomie fourragère, à travers notamment le bilan fourrager.

L'analyse du calendrier de pâturage montre que les ressources herbagères pâturables de ces deux systèmes semblent sous-utilisées. Les leviers possibles pour améliorer la valorisation de l'herbe sont de plusieurs ordres : une diminution de la surface allouée au pâturage au profit de la fauche afin de sécuriser le système fourrager, une augmentation générale du chargement, ou encore une diminution des apports de concentrés au pâturage pour augmenter l'ingestion d'herbe au pâturage. Ces différents leviers sont autant de marges de manœuvre exploitables pour améliorer le degré d'autonomie fourragère et alimentaire à l'échelle de l'exploitation. Néanmoins, le simulateur Dynamilk, en optimisant les règles de gestion du système fourrager, traduit un fonctionnement « idéal » du système, certainement difficile à atteindre en pratique.

CHAPITRE VII

**7 QUEL SYSTEME POUR UNE MEILLEURE
AUTONOMIE ALIMENTAIRE ET
FOURRAGERE A L'ECHELLE DE
L'EXPLOITATION ?**

7.1 Choix des systèmes étudiés

7.1.1 Scénarios et hypothèses

7.1.1.1 *Quels systèmes simuler ?*

Pour répondre à l'objectif de recherche de cette thèse qui est d'étudier les compromis qu'il est possible d'atteindre entre performances animales, utilisation durable des ressources alimentaires et herbagères et la recherche d'un plus grand degré d'autonomie à l'échelle de l'exploitation, nous avons choisi de tester plusieurs systèmes contrastés ayant des stratégies de production différentes : nos scénarios d'étude. Nous avons construit ces scénarios d'étude en fonction de notre hypothèse de recherche selon laquelle une meilleure adéquation entre la dynamique d'offre herbagère et la dynamique de production animale permettrait d'améliorer ces compromis et le degré d'autonomie.

Nous voulons ainsi comparer deux systèmes, caractérisés selon leur répartition des vèlages au cours de l'année, déterminant la dynamique des besoins alimentaires du troupeau.

Ainsi, en premier, nous souhaitons étudier les systèmes que nous appelons « classiques », reposant sur **une répartition des vèlages en automne et en hiver**. Ces systèmes sont ceux par exemple décrits dans le cas-type référentiel BL15 des Réseaux d'Élevage « Système laitier spécialisé et modernisé en zone toute herbe » utilisé dans le Chapitre 6 (Reuillon, 2008). Ils sont donc largement dominants dans la zone géographique « volcanique tout herbe », moyenne montagne (800 à 1000m d'altitude). En effet, au cours d'une étude réalisée sur les « *Relations entre période de vèlages et conduite des surfaces fourragères : étude dans des élevages laitiers herbagers du Puy-de-Dôme* » (Jacquot *et al.*, 2010), nous avons établi une typologie de 63 exploitations, présentant une stabilité interannuelle de la répartition des vèlages. Cette typologie indique que les exploitations ayant des vèlages groupés de septembre à décembre sont très fréquemment représentées dans les systèmes existants puisqu'elles constituent le deuxième groupe d'exploitation (21 exploitations), derrière les systèmes basés sur des vèlages étalés toute l'année (29 exploitations). La principale caractéristique de ces systèmes est de produire une majeure partie de la production laitière à partir de fourrages conservés lors de la période hivernale.

Le deuxième système que nous voulons étudier, bien que non distingué en tant que tel dans nos enquêtes, repose à l'inverse sur une **répartition des vèlages en fin d'hiver et au printemps**. Cette répartition des vèlages est très répandue dans les systèmes herbagers en zone climatique océanique ou tempérée où la pousse de l'herbe est saisonnière avec un pic de croissance au printemps, et une croissance minimale en hiver (Dillon *et al.*, 1995, McCall et Clark, 1999, Macdonald *et al.*, 2008). Ainsi la majeure

partie de la production de lait s'effectue avec une alimentation basée sur de l'herbe pâturée. La vocation principale de ce type de système de production est de profiter au mieux de la forte croissance herbagère au printemps en faisant pâturer des vaches laitières en début de lactation et ayant de forts besoins énergétiques (McCall et Clark, 1999, Farina *et al.*, 2011). L'objectif sous-jacent est alors de maintenir les coûts de production à un niveau très faible en optimisant l'utilisation de la ressource alimentaire la moins coûteuse à savoir l'herbe, et en limitant au maximum le recours aux fourrages conservés, coûteux à récolter et à stocker (Dillon *et al.*, 1995, McCall et Clark, 1999). Ce type de système présente donc une voie appropriée pour améliorer le degré d'autonomie alimentaire et fourragère à l'échelle de l'exploitation. Il est alors pertinent de le simuler afin de voir si ces systèmes sont adaptables en zone montagnarde, présentant des contraintes climatiques, malgré leur absence représentative dans les enquêtes. Le regroupement des vèlages en fin d'hiver et printemps a été testé afin de minimiser l'utilisation des intrants en zone montagnarde, en Autriche (Steinwidder *et al.*, 2010, Steinwidder *et al.*, 2011). Ce type de système est d'autant plus pertinent que la pratique de regrouper les vèlages en fin d'hiver et début printemps était le système traditionnellement en vigueur dans les zones montagnardes comme la Savoie, le Massif central, le Jura ou encore les Vosges (Jussiau, 1999). Vu l'isolement de ces régions, les paysans conservaient le lait sous forme de fromages de garde, tels que le salers, le comté ou le beaufort. Or, ces fromages de grande taille nécessitent une grande quantité de lait et donc une importante production laitière du cheptel, à raison de 9.5 à 12 kg de lait pour 1kg de fourme par exemple (Mayaud, com. Perso.). Les conditions de récolte et de stockage des fourrages étant jadis difficiles et coûteuses, la production laitière et donc, la production fromagère, débutaient alors à la montée des animaux en alpage, ou estives, et s'achevaient définitivement à la rentrée étable, fin octobre (Poitrineau, 1984, Faure, 1999). Ce système traditionnel caractérise encore les exploitations laitières produisant et adhérant au cahier des charges de l'AOP salers (Brunschwig *et al.*, 2000).

7.1.1.2 *Les deux systèmes étudiés et leurs hypothèses*

Nous pouvons élaborer plusieurs hypothèses sur les performances de ces deux systèmes en fonction de leurs caractéristiques.

- ◆ « **GA** » : Système basé sur une répartition des vèlages groupés en automne et début d'hiver

Les vaches débutant leur lactation en stabulation, nous pouvons supposer que les besoins en fourrages conservés de qualité sont importants. L'alimentation hivernale est marquée par un apport nutritionnel constant et, la production laitière devrait donc être maîtrisée et ne pas présenter de variation particulière. Cependant, ce système laisse supposer qu'il est sensible à la constitution des stocks fourragers, en quantité, mais aussi en qualité.

- ◆ « **GP** » : Système basé sur une répartition des vèlages groupés fin d'hiver et début printemps

A l'opposé du système « GA », la lactation s'effectuant majoritairement au pâturage, les besoins fourragers globaux devraient être moindres. Ainsi, nous pouvons supposer que ce système devrait être plus sensible à la production d'herbe en quantité et qualité durant la saison de pâturage, mais moins sensible à la constitution des stocks fourragers et à leur qualité, variable d'une année sur l'autre. Nous pouvons également présumer que ce système valorise mieux l'herbe pâturée, mais peut présenter une variabilité importante de la production laitière annuelle. En effet, cette dernière est la résultante de l'offre herbagère, variable d'une année sur l'autre en fonction des conditions climatiques.

7.1.2 Description des scénarios et paramétrage des fichiers d'entrée

Pour construire les scénarios représentant les deux systèmes que nous voulons simuler et étudier, nous avons fait le choix d'utiliser une même « structure de base » pour les deux systèmes. En effet, afin de pouvoir comparer les deux systèmes entre eux, nous n'avons fait varier que quelques paramètres, toutes choses égales par ailleurs.

7.1.2.1 Présentation de la structure de base invariante

La base structurelle invariante des deux systèmes a été construite à partir de données récoltées en enquêtes en exploitations et des bases de données du contrôle laitier de l'EDE63 dans le cadre de l'étude sur *les Relations entre période de vèlages et conduite des surfaces fourragères : étude dans des élevages laitiers herbagers du Puy-de-Dôme* (Jacquot *et al.*, 2010). Cette étude a été réalisée dans le cadre d'un module d'enseignement des élèves ingénieurs de 3^{ème} année de VetAgro Sup de l'option Elevages et Systèmes de Production, en partenariat avec l'EDE 63. Les enquêtes ont été réalisées sur la zone géographique élargie de l'AOP saint-nectaire, correspondant au système laitier spécialisé modernisé décrit par le BL15 des Réseaux d'Elevage avec les mêmes caractéristiques pédoclimatiques : une altitude moyenne de 880m, des précipitations régulières et une majorité de prairies permanentes dans la surface agricole utile.

Le questionnaire des enquêtes a été construit en cohérence avec l'architecture et le fonctionnement du modèle Dynamilk. Celui-ci a permis de récolter des données précises sur la structure de l'exploitation, le parcellaire et ses caractéristiques géographiques, le fonctionnement du système fourrager et toutes les pratiques attenantes, le troupeau et ses caractéristiques zootechniques, les pratiques d'alimentation et d'allotement. Les données sur le troupeau ont été complétées par les informations du contrôle laitier en termes de performances et de reproduction.

Nous avons ainsi pu disposer des informations nécessaires pour l'élaboration de l'exploitation représentative du système « GA ». Elle a été construite à partir de la

moyenne des données de quatre exploitations appartenant au groupe « vêlages groupés de septembre à décembre » de la typologie réalisée au cours de cette étude. La structure de base des deux systèmes est issue de cette exploitation représentative. Cette exploitation est définie par une SAU de 81.3 ha. Le troupeau est constitué de 51 vaches laitières ayant une production moyenne réalisée de 7039 litres par lactation pour un quota de plus de 350 000 litres par campagne. L'âge du premier vêlage est en moyenne de 32 mois avec un taux de renouvellement de 31%. Les vêlages s'étalent de fin août à début mars avec un pic de septembre à début décembre. La ration de base des vaches en lactation est composée en moyenne d'un mélange d'ensilage d'herbe, de foin de 1^{ère} coupe et de regains. Cependant, cette composition est variable selon le stade de lactation. Ainsi certaines exploitations de notre échantillon substituent progressivement l'ensilage au profit du foin de 1^{ère} coupe lors de la deuxième partie de lactation. Les animaux sont également complétés selon une composition variable en qualité et en quantité selon les exploitations. Pour certaines exploitations, l'apport en aliments concentrés diffère selon le stade de lactation (de 0.5 à 4.5 kg.VLL⁻¹.j⁻¹ par exemple).

A partir de ces données, nous avons ainsi paramétré le troupeau laitier sur la base de **51 vaches laitières** avec un potentiel de production de **7 000 litres par lactation**. L'âge au premier vêlage est de 3 ans avec un taux de renouvellement de 31%. La conformation moyenne des animaux est de 650 kg avec une note d'état corporelle au vêlage de 3, aussi bien pour les primipares que pour les multipares. Le poids de naissance du veau est ajusté à 45kg. La ration de base des vaches en lactation est composée de 70% de foin de bonne qualité et de 30% de regains. Nous avons choisi de compléter les vaches en lactation à hauteur de **1200kg** par animal et par an, soit 170g.l⁻¹.

La structure de l'exploitation est définie par une stabulation libre, une capacité maximale de stockage non limitante fixée à 4.5 t.UGB⁻¹. Les pratiques relatives à la gestion du système fourrager sont : le pâturage, géré en pâturage tournant « normal », les fauches précoces (ensilage ou enrubannage), les fauches tardives et les regains. Quand la disponibilité en herbe est suffisante et les conditions climatiques bonnes, une 3^{ème} coupe est pratiquée sur les parcelles qui ne peuvent pas être pâturées. Le déprimage est pratiqué sur certaines parcelles récoltées en foin séché au sol. Le paramétrage des règles de pilotage est identique pour les deux systèmes et similaire au fichier « scénario » présenté en annexe de cette thèse.

7.1.2.2 *Éléments variants des deux systèmes étudiés*

Troupeau et distribution des vèlages

Comme nous l'avons vu précédemment, seule la distribution et la période des vèlages varient entre les deux systèmes étudiés (Figure 1). La distribution des vèlages du système « GA » suit strictement la répartition moyenne des quatre exploitations étudiées. Nous avons choisi de paramétrer les vèlages du système « GP » entre début mars et fin mai, avec un fort pic de vèlages au mois d'avril. Ainsi, une majorité des vèlages est effectuée avant la mise à l'herbe.

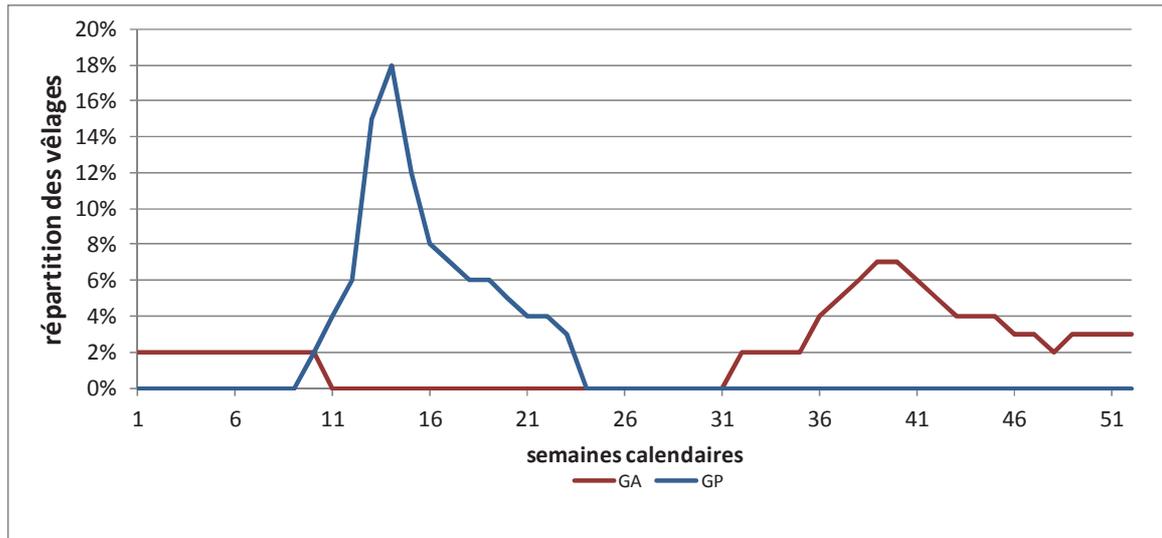


Figure 1: distribution des vèlages des deux systèmes étudiés (GA : groupé automne et début d'hiver; GP: groupé fin d'hiver et printemps). La répartition est exprimée en % par semaine.

Grâce au modèle de démographie du troupeau, les courbes de production laitière potentielle du lot des vaches en lactation et de distribution associée des apports d'aliments concentrés peuvent être générées (Figure 2). Ainsi ces courbes permettent de prendre en compte la dynamique des besoins du troupeau au cours de l'année et d'impulser la dynamique de production potentielle, propre à chaque système.

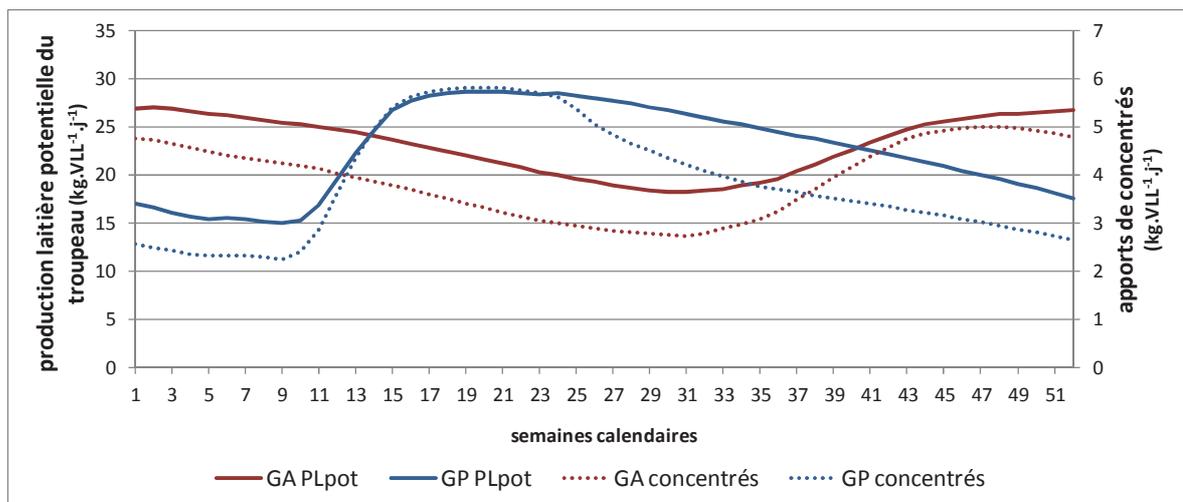


Figure 2 : répartition sur l'année de la production laitière potentielle du lot vaches laitières, PLpot, et des apports d'aliments concentrés, indexés sur la PLpot. (Les quantités sont exprimées par animal)

Parcellaire et système fourrager

Le parcellaire du système « GA » est directement créé à partir des données récoltées en enquêtes sur la gestion du parcellaire et les pratiques associées. Ainsi, sur une SAU de 81.4 ha, **48% est fauché en 1^{ère} coupe** soit 39.1 ha. 80% de cette surface est ensuite consacrée aux 2^{èmes} coupes afin de constituer les stocks de regains (31.6 ha). Quand la disponibilité en herbe est suffisante et les conditions climatiques bonnes, une 3^{ème} coupe est pratiquée sur les parcelles qui ne peuvent pas être pâturées. Le déprimage est pratiqué sur certaines parcelles récoltées en foin séché au sol (7,8ha). Une large partie des 1^{ère} coupes est consacrée à la récolte d'ensilage d'herbe préfanée ou d'enrubannage (41% des surfaces fauchées, soit 16,6 ha). 52% de la SAU est ainsi consacrée uniquement au pâturage (42.2 ha) dont 13.6 ha réservés aux pâtures des vaches laitières et 28.6 ha pour le reste du troupeau. Les vaches en lactation disposent alors de 27 ares par animal au printemps. Le parcellaire, tel qu'il a été paramétré est représenté sur la Figure 3.

Pour la formation du parcellaire du système « GP », nous avons décidé de changer l'usage de certaines parcelles pour que le système fourrager soit plus en cohérence avec l'hypothèse élaborée pour le système « GP », à savoir de moindres besoins en fourrages conservés et des vaches laitières en début de lactation au printemps avec de forts besoins alimentaires. Nous avons diminué la surface consacrée aux premières coupes au profit du pâturage pour les vaches en lactation. Nous avons ainsi diminué le rapport entre la surface de fauche et la surface pâturée au printemps de 10%. **La surface fauchée en 1^{ère} coupe représente alors 38% de la SAU**, le reste étant consacré au pâturage.

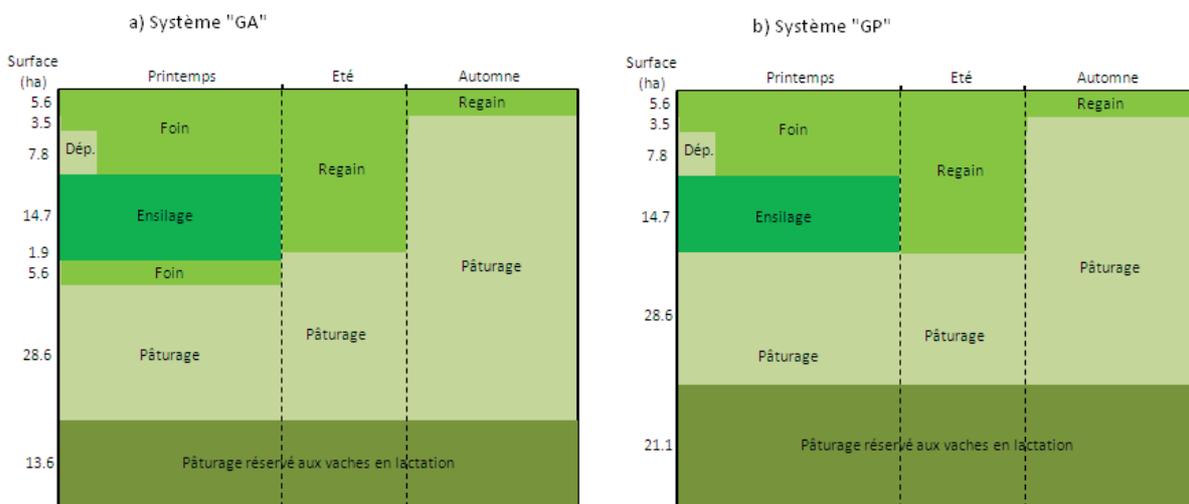


Figure 3 : description des deux parcellaires et leurs usages planifiés par parcelle et par saison pratique des systèmes « GA » et « GP »

En plus des usages, chaque parcelle est décrite précisément par sa composition botanique et ses caractéristiques agronomiques. Pour paramétrer chaque parcelle, nous nous sommes référés à la description des communautés des couverts herbacés des prairies permanentes réalisée par Jouven *et al.* (2006a, 2007).

Tableau 1: composition botanique des parcelles selon leurs usages

	Composition botanique				Indice nutrition	Réserve Utile
	A	B	C	D		
Fauche tardive en 1 ^{ère} coupe	40	40	20	0	0.80	80
Fauche précoce en 1 ^{ère} coupe	50	50	0	0	0.85	80
Pâturage réservé vaches en lactation « riche »	50	50	0	0	0.85	80
Pâturage réservé vaches en lactation « moyen »	40	40	20	0	0.80	80
Pâturages réservés aux autres lots	10	40	50	0	0.75	80

7.2 Choix des indicateurs pour évaluer les systèmes

Pour comparer les performances productives et le degré d'autonomie alimentaire et fourragère à l'échelle de l'exploitation des deux systèmes contrastés ainsi que leur évolution au fil du temps, nous avons analysé les résultats des différentes composantes des systèmes de production. Devant la multitude de résultats et de données fournies par Dynamilk, il convient de développer une grille d'analyse comportant certains indicateurs-clés du système de production. En effet, Dynamilk connaît et enregistre quasiment chaque variable-état du simulateur chaque jour simulé.

Pour établir les indicateurs du système, nous nous sommes basés sur la méthodologie élaborée par Mollenhorst (2005). Les indicateurs doivent donc respecter les principes de:

- ◆ Pertinence : les indicateurs doivent être reliés à un ou plusieurs points de la problématique d'étude
- ◆ Simplicité : les informations présentées par les indicateurs doivent être simples et compréhensibles par les utilisateurs
- ◆ Qualité : les informations données par les indicateurs doivent être sensibles et fiables par rapport à la question utilisée. Elles doivent être sensibles aux changements du système
- ◆ Mise en perspective : les informations peuvent être discutées par rapport à des références, des valeurs-cibles identifiées, des tendances

Dans le cadre de la comparaison des deux systèmes contrastés, l'indicateur doit être en relation avec l'objectif principal, à savoir l'étude du degré d'autonomie fourragère et alimentaire à l'échelle de l'exploitation tout en informant sur les performances du système de production. La Figure 4 recense les principaux points d'étude relatifs à l'objectif recherché. Les indicateurs développés sont de deux ordres : « statiques » avec une donnée informative par an sur le système (par exemple le bilan fourrager ou le taux d'utilisation de la biomasse), ou « dynamiques » permettant de rendre compte de l'évolution du système au fil du temps simulé (par exemple la production laitière quotidienne). Grâce à l'utilisation du concept de découpage d'une année en saisons-pratiques dans la structure conceptuelle du modèle, certaines informations peuvent être connues à l'échelle d'une saison : hiver d'un côté et pâturage de l'autre, par exemple.

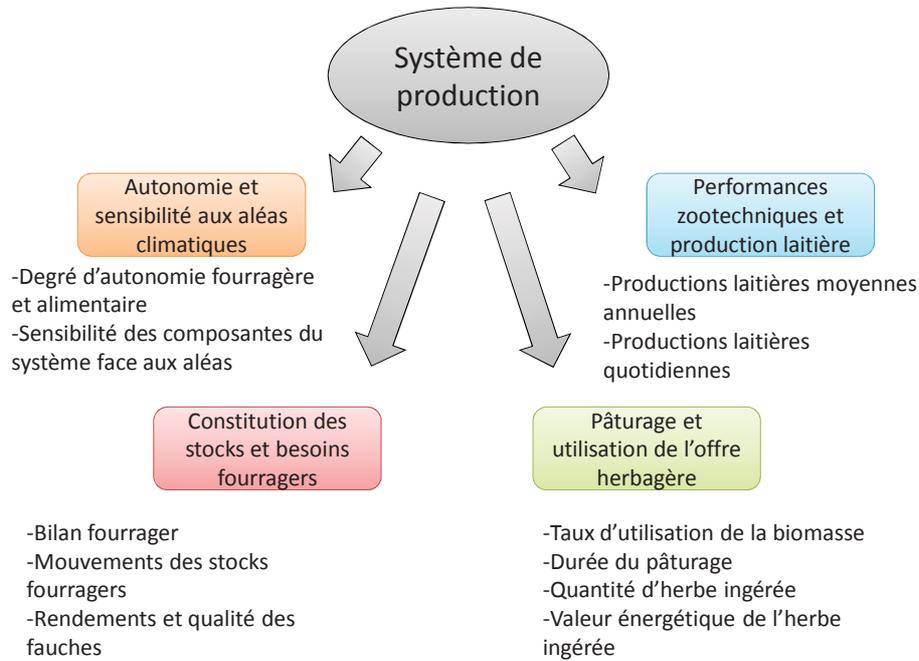


Figure 4 : identification des indicateurs pertinents pour comparer les performances des deux systèmes de production contrastés

Certains indicateurs sont issus de l'agrégation de résultats bruts comme les calculs d'autonomie fourragère et alimentaire, le bilan fourrager ou encore le taux d'utilisation de la biomasse. Les équations permettant de calculer le bilan fourrager, le taux d'utilisation et le degré d'autonomie sont présentées ci-dessous :

◆ **Bilan fourrager**

Bilan fourrager

$$= (fourrages\ vendus_n - fourrages\ achetés_n - stock\ total_{n-1} + stock\ total_n) / UGB_{totalaux}$$

La quantité totale de fourrages présents dans la grange est inventoriée au moment de la mise à l'herbe, à un jour fixe donné pour toutes les années de simulation.

◆ **Taux d'utilisation**

Le taux d'utilisation de la biomasse au pâturage est ici calculé en effectuant la moyenne du taux d'utilisation de la biomasse des parcelles uniquement occupées par le lot des vaches laitières. Le taux d'utilisation de la biomasse d'une parcelle est le rapport entre la somme de la biomasse prélevée par les animaux (biomasse résultant de la somme pondérée des quatre compartiments simulant le couvert végétal) et la somme de la biomasse produite quotidiennement sur la parcelle sur toute la saison de pâturage (Jouven *et al.*, 2007).

◆ **Autonomie**

D'une manière générale, l'autonomie peut être définie comme étant la part des aliments produits sur l'exploitation par rapport à ceux consommés. La quantité de fourrages complémentaires achetés et de concentrés apportés dans la ration étant

connus, le calcul d'autonomie fourragère et alimentaire peut s'effectuer selon les équations présentées ci-dessous (Veysset, 2010). Nous avons choisi de raisonner sur la base de l'unité fourragère laitière.

$$\begin{aligned} & \textit{Autonomie alimentaire} \\ & = 1 - \left\{ \frac{(\textit{fourrages achetés} + \textit{concentrés achetés})}{\textit{consommation totale}} \right\} \end{aligned}$$

$$\textit{Autonomie fourragère} = 1 - \left\{ \frac{(\textit{fourrages achetés})}{\textit{consommation totale}} \right\}$$

Nous avons également évalué la « production laitière autonome », toujours en raisonnant sur la base de l'unité fourragère laitière. En considérant qu'un litre de lait équivaut à 0.44 UFL et que le fourrage acheté et le concentré utilisé ne sert uniquement qu'à produire du lait, la production laitière autonome résulte de la part des « UFL achetés » sur les « UFL produits ».

Seulement une partie du traitement des résultats bruts et des indicateurs du système de production et de son évolution est présentée dans ce chapitre et cette thèse. L'ensemble de ce travail de traitements des données a été effectué en collaboration avec Yoan Godron, informaticien de l'INRA qui a permis d'automatiser un grand nombre de traitements grâce la programmation VBA-excel.

7.3 Résultats des simulations

Nous avons simulé le système « GA » et le système « GP » sur une même longue série climatique, de 1993 à 2011. Les données climatiques journalières sont issues de la station météorologique de Marcenat (Massif central).

Le simulateur fonctionnant en régime de croisière, nous avons retiré les résultats des deux premières années de simulation, 1993 et 1994. En effet, les résultats du bilan fourrager sont notamment perturbés lors de ces deux années par les stocks fourragers initiaux permettant d'amorcer les simulations. De même, il avait été démontré que le modèle de végétation convergait rapidement vers un fonctionnement à l'équilibre au-delà de deux années de simulation (Jouven *et al.*, 2006b et 2006a).

7.3.1 Performances zootechniques et production laitière

7.3.1.1 Etude de la variabilité interannuelle de la production laitière

Nous avons ainsi comparé le niveau de performances de production des deux systèmes à travers la production laitière moyenne par année et par animal sur 17 années (Figure 5 ; Tableau 2).

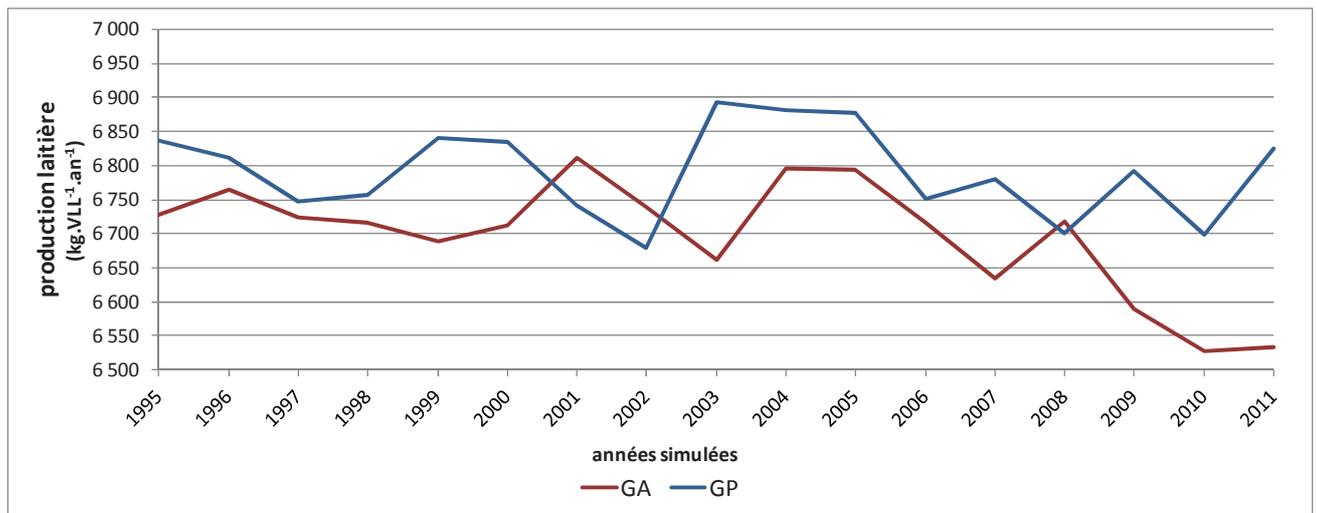


Figure 5 : Productions laitières moyennes réalisées des deux systèmes simulés (kg.VLL⁻¹.an⁻¹)

Tableau 2 : Analyse des productions laitières annuelles selon les deux systèmes étudiés (en kg.VLL⁻¹.an⁻¹)

	Moyenne	Ecart-type	CV (%)	Minimum	Maximum
GA	6697	84.5	1.3	6527	6811
GP	6791	66.2	1.0	6680	6893

Selon les résultats de Dynamilk, Tableau 2, la production laitière moyenne réalisée du système « GP » est plus importante que celle du système « GA » avec 100kg de lait par animal et par an en moyenne (différence significative, test-t p=0.001). Par ailleurs, selon la Figure 5, la production laitière moyenne annuelle par vache laitière varie moins

entre les années dans le système GP que dans le système GA. Ceci est confirmé par l'écart-type plus faible du système « GP » que celui du système « GA », le système basé sur les vêlages groupés au printemps permet ainsi une production laitière moyenne annuelle plus constante d'une année sur l'autre. Ceci est confirmé par l'écart plus faible pour GP entre les deux années la plus et la moins productive (211 kg.VLL⁻¹.an⁻¹ contre 284). *A priori*, selon ce résultat, l'hypothèse formulée selon laquelle la variabilité de la production laitière devrait être plus importante pour le système GP que le système GA, du fait de la variabilité de l'offre herbagère au pâturage, est infirmée.

Par ailleurs, nous pouvons décomposer la variabilité de production laitière selon les saisons hiver et pâturage, Tableau 3. Ainsi lors de la saison pâturage, le système GP présente une variabilité plus importante que le système GA à travers un écart-type plus important, montrant une production laitière éventuellement plus sensible à la variabilité de l'offre herbagère. *A contrario*, le système GA présente un écart-type de la production laitière en hiver plus important que le système GP, démontrant, quant à lui, que ce système est plus sensible à l'offre fourragère, compte-tenu des apports invariants de concentrés.

Tableau 3: Analyse de la variabilité de la production laitière moyenne en hiver et au pâturage des deux systèmes simulés (en kg de lait)

	GA		GP	
	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type
Hiver	218 507	3 738	151 970	2 139
Pâturage	125 062	2 323	194 382	3 238

7.3.1.2 Dynamique intra-annuelle de la production laitières

Les vaches en lactation produisent en moyenne 21.46 kg.VL⁻¹.j⁻¹ pour le système GA et 21.49 kg.VL⁻¹.j⁻¹ pour GP tout au long d'une lactation (moyennes non significativement différentes, test-t p=0.897).

En visualisant les productions laitières journalières de chaque année sur un même graphique (Figure 6 pour le système GA, Figure 7 pour le système GP), nous pouvons identifier plusieurs évènements remarquables en fonction de la saison mais aussi des stades de lactation propres à chaque système. En effet, la production laitière de la saison hivernale est parfaitement identifiable pour les deux systèmes par la grande stabilité de la production, seul le niveau de production varie en fonction de la qualité des fourrages conservés. Par exemple, la variation entre l'année plus productive et la moins productive est de 3,03 kg.VLL⁻¹.j⁻¹ pour le système GA contre 1.41 pour le système GP début janvier. De plus, nous pouvons noter que la production laitière réalisée en alimentation hivernale est chroniquement plus faible que la production laitière potentielle pour le système GA alors qu'elle est plus élevée pour le système GP. Ceci est principalement dû au fait que les vaches sont en début de lactation en hiver pour le système GA et plutôt en fin de lactation pour le système GP. Les vaches en début de lactation sont donc plus sensibles à la qualité des fourrages ingérés.

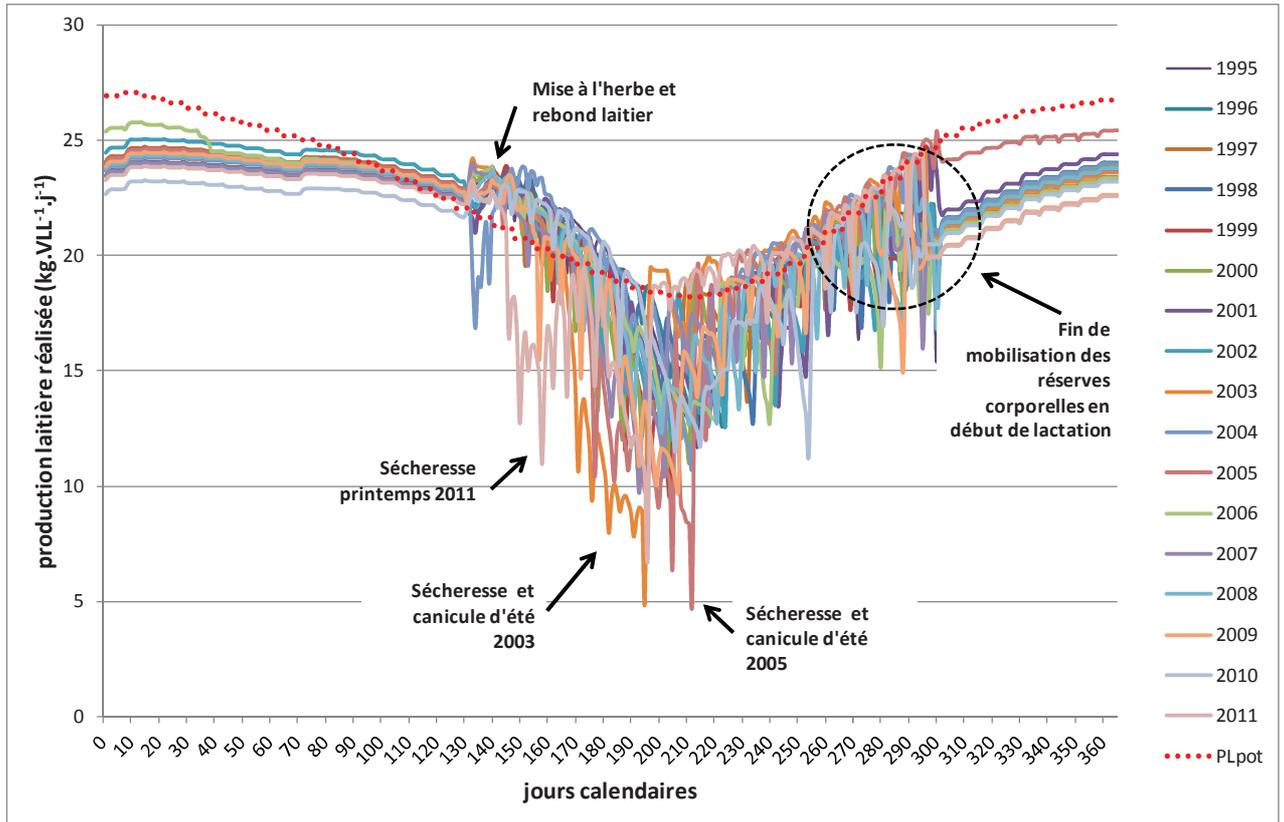


Figure 6 : productions lactières journalières de chaque année simulée du système "GA"

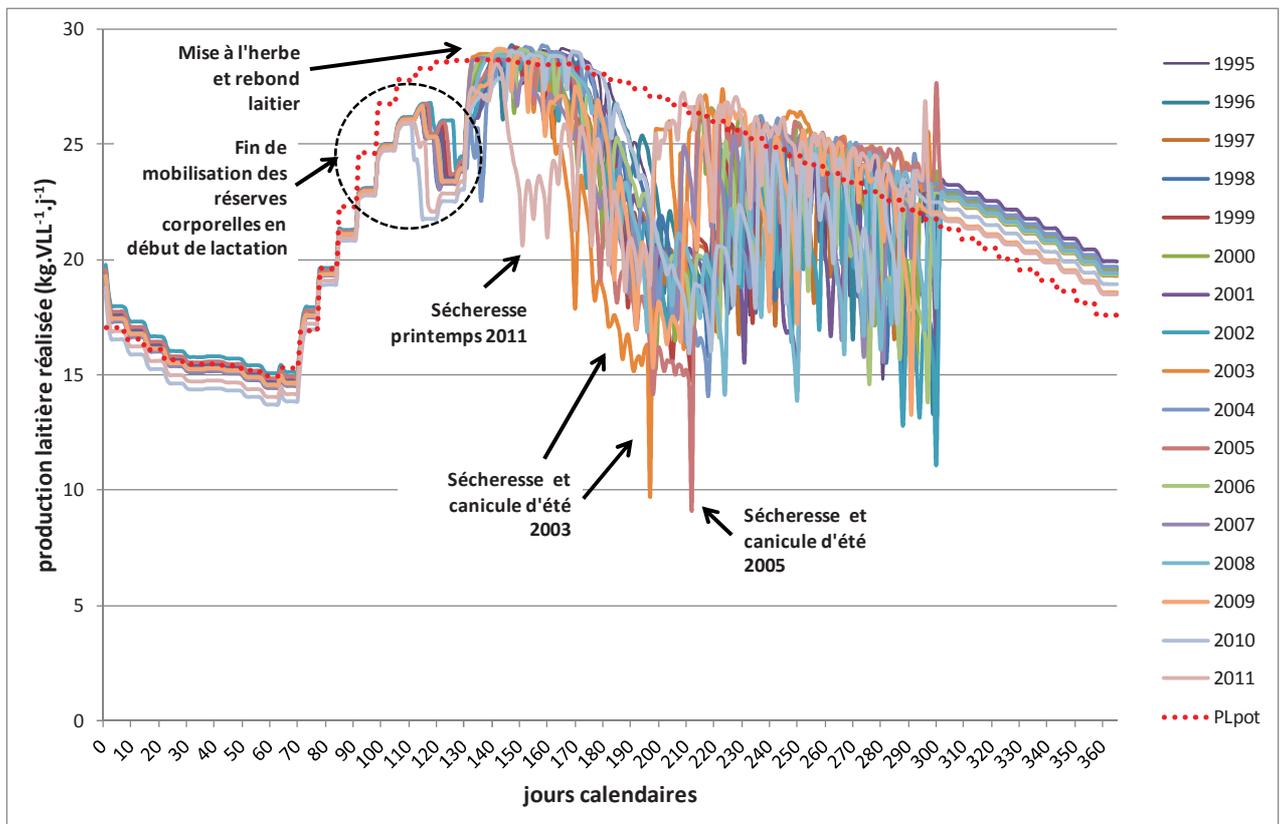


Figure 7 : productions lactières journalières de chaque année simulée du système "GP"

Pour le système « GA » (Figure 6), nous pouvons identifier la mise à l'herbe et le rebond laitier associé au passage d'une alimentation basée sur des fourrages conservés à une alimentation basée sur l'herbe pâturée de bonne qualité et en abondance. La production laitière printanière est soutenue et assez peu variable. L'offre herbagère permet ainsi d'atteindre des niveaux de production proches, voire supérieurs à des niveaux de production laitière potentielle. La production laitière estivale est plus variable et plus faible que la PLpot (cet écart peut atteindre jusqu'à 4,6 kg de lait par jour et par animal en moyenne). Les années difficiles, telles que 2003 ou 2005, sont discernables par une chute très importante de la production laitière pouvant atteindre respectivement 5 et 4.9 kg de lait par jour et par animal en regard d'une PLpot de 18.6 et 18.2 kg de lait. La production laitière réalisée augmente ensuite pour atteindre des niveaux plus proches de la production laitière potentielle, malgré des animaux en début de lactation avec de forts besoins alimentaires. Cependant, cette production laitière réalisée reste variable d'une année sur l'autre. La pousse de l'herbe en fin d'été et en automne permet d'assurer une offre herbagère suffisante et de qualité permettant de couvrir quasiment les besoins alimentaires des animaux. Cette offre herbagère est telle qu'elle ne permet pas de visualiser la fin de mobilisation des réserves corporelles en tant que telle sur la Figure 6. Par ailleurs, nous pouvons noter que la transition entre le pâturage et la rentrée étable est marquée par une diminution notable de la production laitière qui peut atteindre entre 1 et 3 kg de lait par animal et par jour. Cette diminution dépend de la qualité des fourrages conservés offerts aux animaux.

Pour le système « GP », Figure 7, nous pouvons parfaitement identifier la fin de mobilisation des réserves corporelles lors de la première partie de lactation qui se situe autour des jours 110 et 120. La production laitière moyenne journalière du troupeau diminue alors de 1 à 3 kg de lait par jour et par animal. Lors de la mise à l'herbe, nous pouvons remarquer une hausse de production laitière notoire, appelée rebond laitier, due à une offre herbagère abondante et de qualité. Ce rebond laitier permet alors d'atteindre le niveau de production laitière potentielle. Globalement, la production laitière printanière du système GP est soutenue, proche du potentiel laitier et peu variable. Cependant, nous pouvons identifier des années climatiques remarquables telles qu'une pousse de l'herbe chaotique en tout début de saison de pâturage 2004 et la sécheresse printanière importante de 2011.

La production laitière en été du système « GP » est nettement inférieure à la production laitière potentielle. Cet écart peut atteindre jusqu'à 7 kg de lait par jour en moyenne en moins par rapport à PLpot fin juillet. Nous pouvons également identifier des années climatiques remarquables telles que la canicule et sécheresse de 2003 et 2005 où la production laitière chute drastiquement pour atteindre respectivement un niveau de 9.7 et 9.2 kg de lait par jour et par animal, comparativement à une production laitière potentielle de 27 et 26.3 kg de lait attendu. La production laitière réalisée du système « GP » remonte ensuite mi-août pour atteindre des niveaux proches de la production laitière potentielle, en étant néanmoins extrêmement variables d'une année

sur l'autre. Ainsi, le système « GP » globalement profite bien de la repousse de l'herbe en automne.

Les trois pics identifiés au moment de la rentrée étable (années 2003, 2005 et 2011) sur le graphique du système « GP » sont dûs à des niveaux d'ingestion très importants lors des derniers jours de pâturage (dû à des temps de séjour sur les parcelles très courts, entre 2 et 3 jours). La production laitière étant calculée sur l'énergie ingérée des deux jours précédents, la production laitière du premier jour en stabulation est alors très importante, d'autant plus que le calcul des besoins alimentaires ne tient plus compte que d'un besoin d'activité de 10% au lieu de 20% au pâturage.

7.3.2 Performances du système fourrager

7.3.2.1 Fourrages récoltés : bilan fourrager, rendements et qualité

En regard des résultats du bilan fourrager des deux systèmes, Tableau 4, le bilan fourrager du système « GA » est supérieur à celui du système « GP » du fait d'une surface plus importante consacrée à la fauche pour un même troupeau, avec 0.51 T MS.UGB⁻¹ contre 0.27 T MS.UGB⁻¹. Ceci explique également l'écart-type et le coefficient de variation plus importants du système GA. De même, sur la Figure 8, les bilans fourragers de deux systèmes sont globalement parallèles à l'exception des années 2005, 2009 et 2011, trois années présentant des sécheresses ayant pénalisé la constitution des stocks.

Tableau 4 : Analyse du bilan fourrager des deux systèmes simulés (T MS.UGB⁻¹)

	Moyenne	Ecart-type	CV (%)	Minimum	Maximum
GA	0.51	0.49	96	-0.29	1.11
GP	0.27	0.41	152	-0.55	0.71

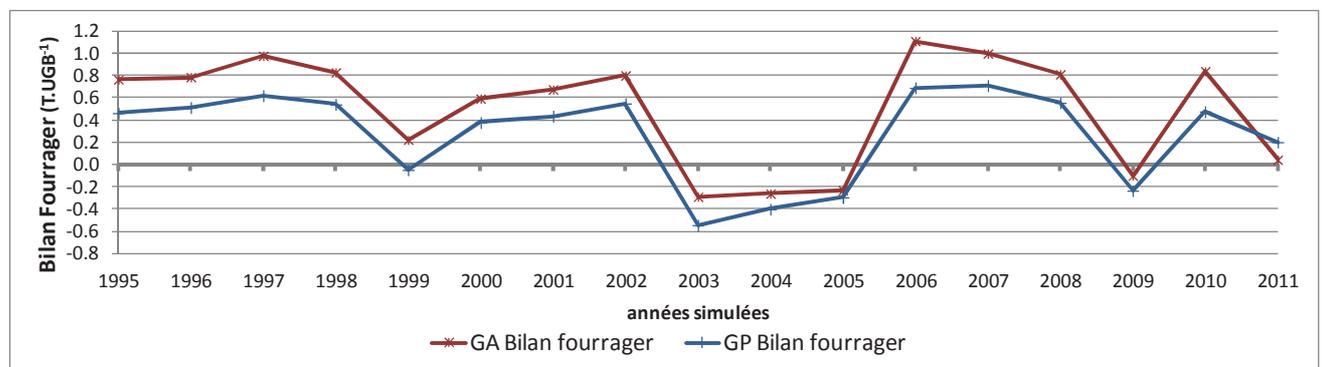


Figure 8 : Bilan fourrager des années simulées des deux systèmes « GA » et « GP »

Sur la Figure 8 et le Tableau 4, nous pouvons voir que le bilan fourrager est généralement excédentaire mais présente des années de déficits telles que 2003, 2004, 2005 et 2009 pour les deux systèmes. L'évolution des bilans fourragers au cours des années simulées montre une relative stabilité, à l'exception de l'année 1999. Depuis 2003, les bilans fourragers sont plus variables d'une année sur l'autre.

Pour étudier plus finement le bilan fourrager, nous pouvons analyser l'évolution de la constitution des stocks, des achats et des ventes de fourrages des deux systèmes, Tableau 5 et Figure 9.

Tableau 5 : Analyse des fourrages récoltés, achetés et vendus des deux systèmes simulés (T MS)

	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum
GA récoltés	139.1	19.9	103.8	191.3
GP récoltés	131.0	18.4	91.8	171.9
GA achetés	0	0	0	0
GP achetés	0.6	1.7	0	5.6
GA vendus	39.0	21.6	4.5	83.0
GP vendus	21.7	17.2	0	58.5

Les fourrages récoltés sont logiquement plus importants dans le système GA, compte-tenu d'une surface fauchée plus importante avec 139 contre 131 T MS. Les deux systèmes présentent un même ordre de grandeur de variation entre les quantités récoltées d'une année sur l'autre.

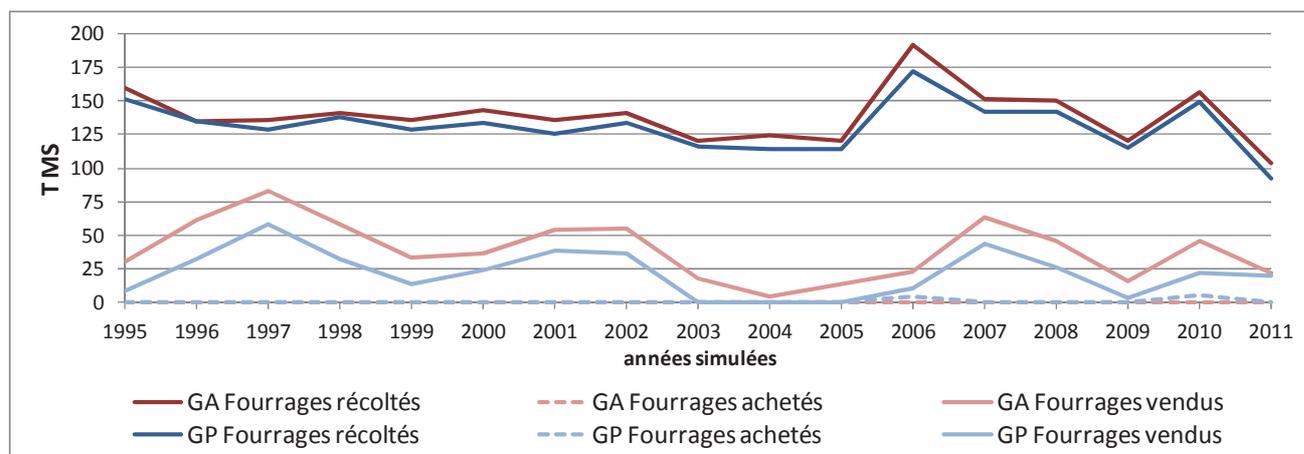


Figure 9 : Quantité totale de fourrages récoltés et quantités de fourrages vendus et achetés des deux systèmes simulés (T MS)

Les deux systèmes vendent chroniquement des fourrages excédentaires (foin de « mauvaise qualité ») et présentent un comportement parallèle pour les volumes vendus, proportionnels à la surface allouée à la fauche au printemps. Sur la Figure 9, nous pouvons confirmer que les deux systèmes fourragers étaient excédentaires de 1995 à 2002. A partir de 2003, les ventes de fourrages sont plus aléatoires, avec, certaines années, peu de ventes voire pas de ventes pour le système « GP ». Par ailleurs, le système « GA » n'a jamais recours à l'achat de fourrages alors que le système « GP » achète ponctuellement des fourrages pour combler un déficit (2006 et 2010). Ces achats font justement suite à un enchaînement d'années où les récoltes sont inférieures à la normale et le bilan fourrager est déficitaire (2003, 2004 et 2005, et ensuite 2009).

Pour l'analyse des rendements des différentes coupes, nous n'avons représenté que les coupes du système « GA » puisque les surfaces fauchées du système « GP » sont identiques (mêmes parcelles avec mêmes surfaces et mêmes caractéristiques botaniques et agronomiques).

Tableau 6 : Analyse des rendements des fourrages récoltés (T MS.ha⁻¹) et leurs digestibilités associées (dmo).

	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum
Rendement C1 précoce	4.28	0.55	2.79	5.08
dmo foin « bonne qualité »	0.66	0.01	0.63	0.67
Rendement C1 tardif	4.16	1.01	2.18	5.45
dmo foin « mauvaise qualité »	0.60	0.02	0.57	0.62
Rendement C2	2.15	0.61	0.91	3.02
Rendement C3	0.97	0.07	0.90	1.19
dmo regains	0.66	0.01	0.63	0.68

Les rendements fourragers sont, en moyenne, de 4.28 et 4.16 T MS.ha⁻¹ pour les fauches en premières coupes, et de 2.15 et 0.97 T MS.ha⁻¹ pour les deuxièmes et troisièmes coupes. Cependant, il existe de grandes variations dans les rendements d'une année sur l'autre, notamment pour les premières coupes, avec un écart de plus de 2.3 T MS.ha⁻¹ pour les fauches précoces et de 3.3 T MS.ha⁻¹ pour les fauches tardives entre l'année la plus et la moins productive. Cependant, selon la Figure 10, les rendements des fauches précoces semblent plus stables que ceux des fauches tardives, à l'exception de l'année 2011. Les fauches tardives sont donc plus sensibles à la sécheresse de fin de printemps affectant ainsi la biomasse récoltée (à l'exception de l'année 2011 ayant vu une sécheresse plus précoce). Cet écart de biomasse est dû à une composition botanique différente entre les parcelles réservées aux fauches précoces et celles en fauches tardives. Les sécheresses affectent aussi la qualité du fourrage récolté comme le montre la digestibilité plus faible lors des années 2003 à 2006, ainsi que 2009. La digestibilité des fourrages précoces semble moins variable.

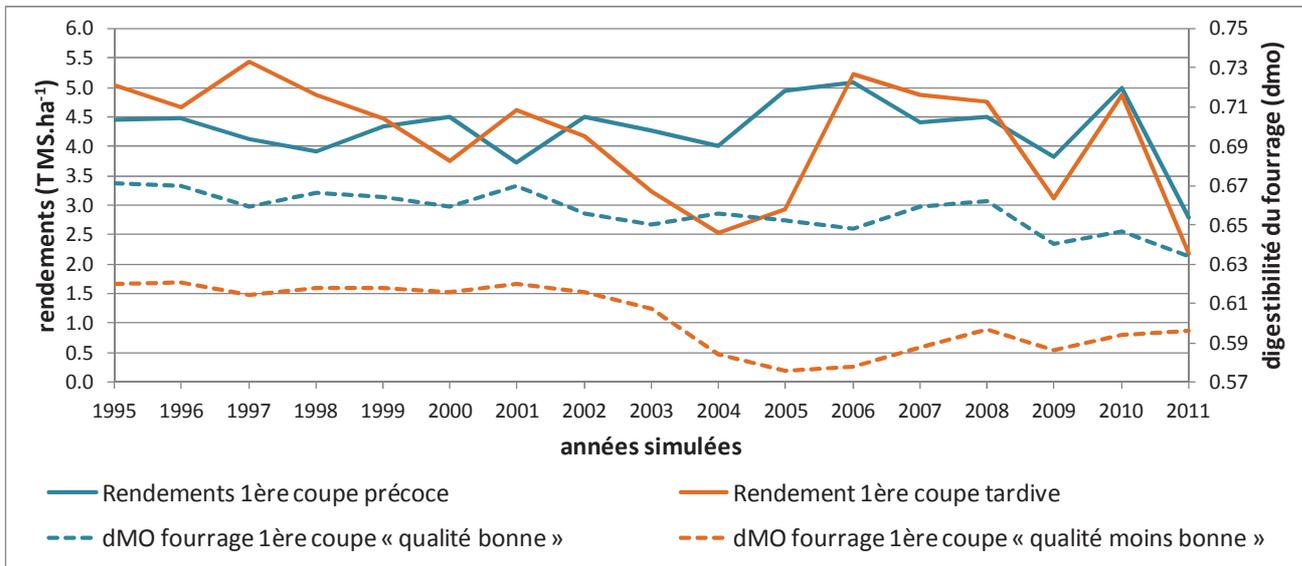


Figure 10: Rendement et qualité des fourrages récoltés en 1ère coupe (système GA)

Les rendements des deuxièmes coupes, Figure 11, sont extrêmement variables d'une année sur l'autre avec un écart de près de 2T MS.ha⁻¹ entre l'année la plus productive (2007) et l'année la moins productive (2005). Les coupes d'été sont donc très sensibles à la constitution de la biomasse, fonction des données climatiques. Les rendements de la troisième coupe sont peu élevés et extrêmement stables. Ce phénomène est dû à des règles de décision paramétrées de telle façon que la troisième coupe se déclenche très tôt et ne permet par d'atteindre des rendements plus importants et variables. La qualité des regains récoltés est variable mais tend à être améliorée au fil des années simulées (à l'exception des années 2007 et 2008).

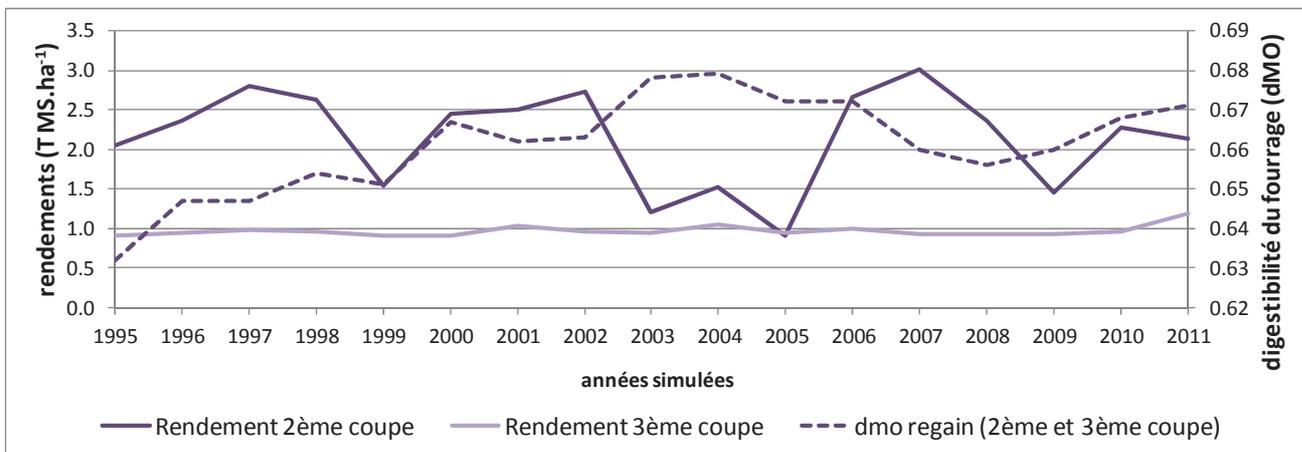


Figure 11: rendements et qualité des fourrages récoltés en 2ème et 3ème coupe (système GA)

7.3.2.2 Pâturage

La durée de saison de pâturage est strictement identique entre les deux systèmes (Tableau 7 ; Figure 12). Ceci est dû à l'utilisation d'une même série climatique et du même paramétrage des règles de décisions pour la mise à l'herbe et la rentrée étable pour les deux systèmes. La durée de la saison de pâturage est relativement stable et varie de 5.6 jours. Elle ne semble pas présenter de tendance au cours des années simulées. Seules les années 1997 et surtout 1999 présentent une saison de pâturage raccourcie avec jusqu'à -15 jours de pâturage par rapport à la moyenne de 164.8 jours. La rentrée étable de ces deux années s'effectue respectivement le 14 octobre et le 4 octobre, comparativement à une rentrée étable en moyenne autour du 22 octobre. Ces deux rentrées étables sont déclenchées par une moyenne de températures de quatre jours consécutifs inférieure à 4°C. La période de pâturage des systèmes simulés dépasse ainsi la plupart des durées minimales autorisées par les cahiers des charges de certaines AOP telles que le saint-nectaire avec un minimum de 140 jours de pâturage, le reblochon, le cantal et le laguiole, avec un minimum de 120 jours pâturés.

Tableau 7 : Durée de la saison de pâturage en jours

	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum
Nombre de jours de pâturage	164.8	5.60	149	169

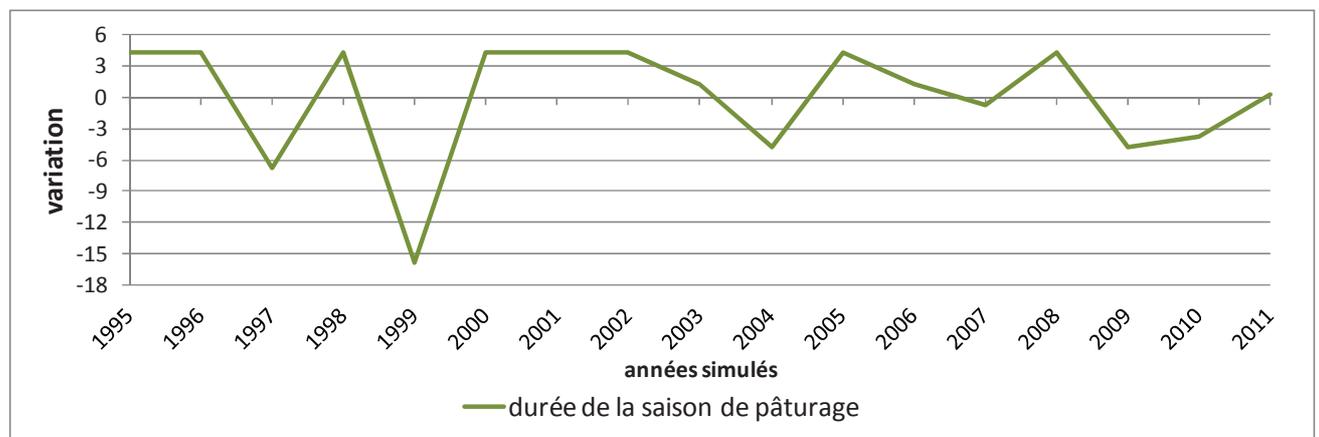


Figure 12 : variation de la durée de saison du pâturage des deux systèmes au cours des années simulées

Les quantités moyennes d'herbe ingérée au cours de la saison de pâturage des vaches laitières et de l'ensemble du troupeau ont ensuite été analysées (Tableau 8 ; Figure 13).

La quantité d'herbe ingérée par les vaches laitières (vaches en lactation et vaches taries) est supérieure pour le système « GP », avec $14.7 \text{ kg MS.VL}^{-1}.\text{j}^{-1}$ contre 13.6 pour le système « GA » (moyenne significativement différente, test-t $p=0.000$). Cette différence est due au stade de lactation des animaux lors de la saison de pâturage : le GP présente

des vaches ayant de plus forts besoins et une capacité d'ingestion plus importante que celles du groupe « GA ». L'écart-type de la quantité d'herbe ingérée de « GA » est plus important que « GP » avec 0.61 contre 0.55. Toutefois, la variation d'ingestion entre les deux années les plus extrêmes peut atteindre 2.55 kg MS.VL⁻¹.j⁻¹ pour « GP » et 2.44 pour « GA ». Cependant, les résultats présentés dans le Tableau 8 montrent que le niveau d'ingestion d'herbe pâturée à l'échelle du troupeau est quant à lui quasiment identique entre les deux systèmes (11.45 et 11.77 kg MS.UGB⁻¹.j⁻¹ ; moyennes non significativement différentes, test-t p=0.162). Ainsi, même si les vaches laitières du système « GP » ont un niveau d'ingestion plus important lors de la saison de pâturage, le niveau d'ingestion des génisses est inférieur à celles du système « GA » avec, en moyenne, 32,4 T MS d'herbe ingérée pour le système « GA » et 26.6 T MS pour le système « GP » (moyennes significativement différente, test-t p=0.000). En effet, pour le système « GP », les vêlages ont lieu au printemps, compte-tenu d'un âge au premier vêlage de 3 ans, les génisses de renouvellement n'effectuent que 2 saisons de pâturage avant de vêler alors qu'elles effectuent 3 saisons de pâturage pour le système « GA ». De plus, pour chaque lot de génisses, les génisses du système « GP » sont caractérisées par un stade de croissance moins avancé que celles du système « GA ». Ce phénomène se traduit par des besoins alimentaires moins importants et donc une ingestion d'herbe moindre. Ainsi la quantité d'herbe prélevée par le troupeau entier n'est pas supérieure dans le système « GP » que « GA ».

Les taux d'utilisation de l'herbe pâturée par les vaches en lactation est supérieure pour le système « GA » avec 26% de la biomasse produite prélevée par les animaux à comparer au système « GP » avec 23% (moyennes pouvant être considérées comme non différentes avec p=0.078, test-t). Ainsi, contrairement à notre hypothèse de construction des scénarios, le système « GP » ne semble pas mieux valoriser l'herbe des pâtures. Compte-tenu des caractéristiques agronomiques et botaniques des parcelles réservées aux vaches en lactation, de type pâture riche (Tableau 1), le taux d'utilisation optimal de la biomasse produite devrait être de 0.49 (Jouven *et al.*, 2007). Or, le taux d'utilisation du système « GA » est moitié moins important.

Pour un même chargement global et un troupeau ayant les mêmes caractéristiques, le système « GP » consacre 10% de la SAU en plus pour le pâturage des vaches en lactation. Pour le système « GA », le chargement au printemps est de 47 VLL et de 40 VLL sur la totalité de la saison de pâturage pour 16.5 ha. Pour le système « GP » ce chargement est en moyenne de 50 VLL au printemps, comme le reste de la saison de pâturage. Or, la surface réservée pour leur pâturage a été augmentée de 8,1 ha. Ainsi, les vaches en lactation du système « GP » ne peuvent valoriser l'ensemble de cette surface, malgré de plus forts besoins alimentaires.

Tableau 8 : Analyse des quantités d'herbe ingérée et des taux d'utilisation de la biomasse sur les parcelles pâturées par les vaches laitières (en kg MS.VL⁻¹.j⁻¹ ; en kg MS.UGB⁻¹.j⁻¹)

	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum
GA QiH (VL)	13.62	0.61	11.61	14.05
GP QiH (VL)	14.74	0.55	12.65	15.20
GA QiH (troupeau)	11.45	0.59	9.55	11.87
GP QiH (troupeau)	11.77	0.54	9.7	12.05
GA (Taux d'utilisation herbe pâturée VLL)	0.26	0.04	0.18	0.33
GP (Taux d'utilisation herbe pâturée VLL)	0.23	0.04	0.15	0.31

La Figure 13, présentant la dynamique d'évolution des quantités moyennes d'herbe ingérée au fil des années simulées, montre que ces quantités varient peu d'une année sur l'autre quelque soit le système étudié. Cependant, les années climatiques remarquables sont parfaitement identifiées telles que 2003 et 2005 avec une chute de la quantité moyenne d'herbe ingérée. Les niveaux d'ingestion de la saison de pâturage de 2003 sont diminués respectivement de 2.3 kg MS.VL⁻¹.j⁻¹ pour le système « GA » et 2.0 kg MS.VL⁻¹.j⁻¹ pour le système « GP ». La sécheresse de 2005 n'a des conséquences que sur les niveaux d'ingestion moyens d'herbe du système « GA » avec une baisse de 1.0 kg MS.VL⁻¹.j⁻¹.

Les taux d'utilisation de la biomasse des couverts herbacés par les vaches en lactation varient très fortement d'une année sur l'autre avec des écarts importants entre les années de forte utilisation et celles avec de faibles utilisations. L'année 1997 est caractérisée par des taux d'utilisation exceptionnellement faibles par rapport à la moyenne avec respectivement 0.18 pour « GA » et 0.15 pour « GP ». Ce phénomène s'explique par une pousse de l'herbe plus importante que les autres années, ayant pour conséquences des temps de séjours longs sur les parcelles. Les niveaux de rendements des différentes coupes de l'année 1997 confirment le fait que cette année 1997 est favorable à la pousse de l'herbe. L'effet inverse se produit dans les années 2003, 2004 et 2005, avec un taux d'utilisation de la biomasse plus important, du fait d'un manque d'herbe sur ces années.

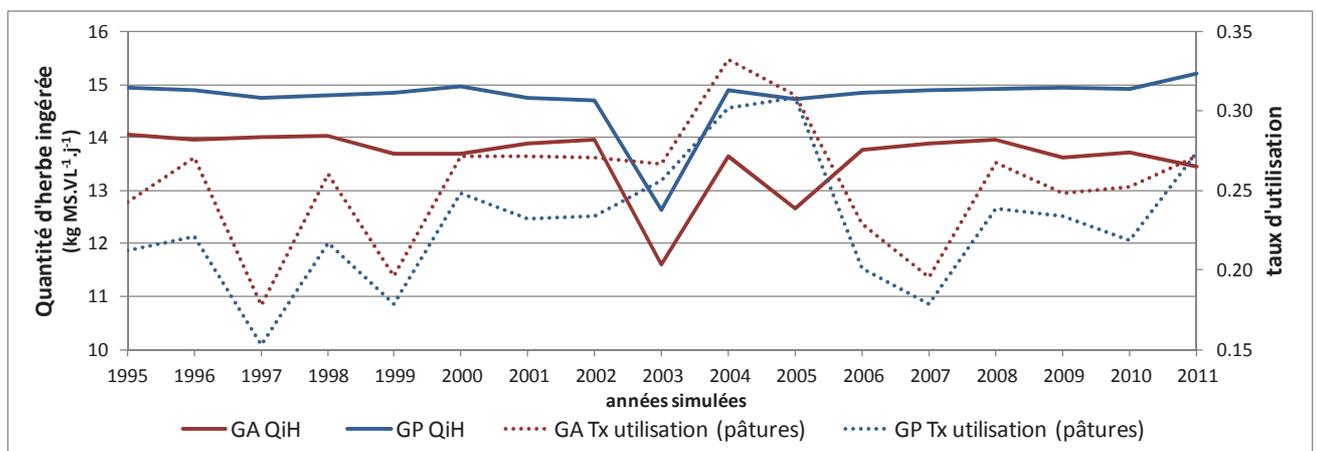


Figure 13 : Quantité d'herbe moyenne ingérée par les vaches laitières au cours de la saison de pâturage et le taux d'utilisation de la biomasse des pâtures réservées aux vaches laitières ; en kg.VL⁻¹.j⁻¹

La valeur énergétique de l'herbe ingérée par les différents lots du troupeau a été également analysée pour étudier l'utilisation de l'herbe pâturée des deux systèmes simulés (Tableau 9 ; Figure 14). Les valeurs énergétiques moyennes de l'herbe ingérée par les vaches en lactation des deux systèmes sont proches (moyennes pouvant être considérées comme étant non différentes, test-t $p=0.081$). Sur toute la saison de pâturage, les valeurs énergétiques moyennes de l'herbe ingérée sont hautes avec 0.84 et 0.83 UFL. Comme le montre la Figure 14, la valeur UFL de l'herbe ingérée au cours de la saison de pâturage pour le système « GA » est notamment supérieure à la valeur moyenne pour les années marquées par des événements climatiques, telles que 2003, 2004, 2005 et 2011. Ce phénomène se remarque également pour le système « GP » avec les années 2003, 2004, 2005, 2009 et 2011. La disponibilité de l'herbe de ces années étant moins forte, la pression de pâturage est plus importante et les animaux sont alors plus sélectifs dans le couvert végétal. Toutefois, les valeurs UFL de l'herbe ingérée présentent des variations d'une année sur l'autre restreintes. L'écart-type des deux systèmes est peu important (0.02 pour GA et 0.03 pour GP). L'écart entre l'année où la valeur UFL de l'herbe ingérée est la meilleure et celle où elle est la moins bonne est respectivement de 0.06 et 0.1 UFL pour les deux systèmes. Les règles de gestion de pâturage mises en place permettent ainsi d'assurer une bonne constance des apports énergétiques offerts par l'herbe.

Tableau 9 : Analyse de la valeur énergétique moyenne de l'herbe ingérée au cours de la saison de pâturage selon les lots (en UFL)

	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum
GA (Vaches en lactation)	0.84	0.02	0.82	0.88
GA (Vaches tarées)	0.83	0.03	0.79	0.89
GA (Génisses)	0.86	0.01	0.84	0.89
GP (Vaches en lactation)	0.83	0.02	0.80	0.84
GP (Vaches tarées)	0.95	0.03	0.91	1.01
GP (Génisses)	0.84	0.02	0.80	0.87

La valeur UFL moyenne de l'herbe ingérée par les vaches tarées présente de forts écarts entre les deux systèmes avec 0.83 pour le système « GA » et 0.95 pour GP (moyennes significativement différentes avec $p=0.000$, test-t). Cette différence est uniquement due à la présence de vaches tarées au début de la saison de pâturage pour le groupe « GP » (22 jours de présence). Ces vaches pâturent alors des couverts végétaux en pleine croissance avec une qualité de l'herbe pouvant atteindre 1.05 UFL sur certaines parcelles.

Les génisses ingèrent une herbe ayant une qualité en moyenne de 0.86 UFL pour le système « GA » et 0.84 pour le système « GP » (moyennes significativement différentes, test-t $p=0.02$). Comme nous l'avons expliqué précédemment, les génisses du système « GP » sont de plus petit format à une même période donnée et les génisses de 2 à 3 ans ont déjà vêlé avant la saison de pâturage ou en tout début. Ainsi les lots de génisses de renouvellement du système « GP » ont une même surface que pour l'autre système, mais un chargement moindre. Elles valorisent moins l'herbe offerte : elles sont moins sélectives, les temps de séjour sont plus longs induisant une rotation des parcelles plus

lente. Ainsi plus la saison de pâturage avance et plus elles pâturent des parcelles ayant une hauteur d'herbe importante et un couvert végétal vieillissant. Elles sont en quelques sortes débordées par l'offre en herbe.

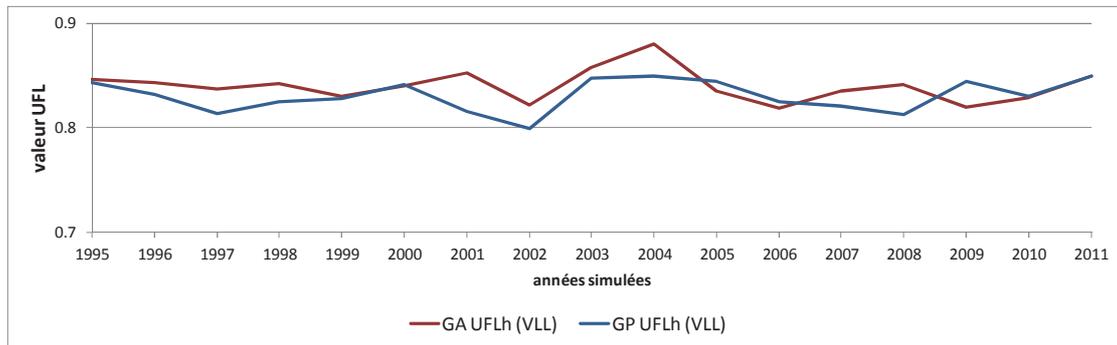


Figure 14 : Qualité de l'herbe ingérée par le lot des vaches en lactation (VLL)

7.3.3 Performances du système de production : autonomie et résistances aux aléas climatiques

Au cours des 16 années simulées, le système « GA » est totalement autonome vis-à-vis de sa consommation de fourrages conservés alors que le système « GP » a recours à des achats ponctuels de fourrages (2006 et 2010). Cependant, la quantité de fourrages achetés est restreinte avec seulement 4.8 et 5.6 tonnes pour l'ensemble du troupeau. En parallèle de ces achats, comme le montre la Figure 9, le système « GP » vend du fourrage de moins bonne qualité à raison de 10 et 22 t. Dans la réalité des pratiques des éleveurs, ces achats de fourrages n'auraient pas eu lieu, au profit d'un report de stocks fourragers sur le lot manquant de fourrages, même au détriment d'une qualité moindre.

L'autonomie alimentaire des deux systèmes peut-être estimée en évaluant l'importance des apports énergétiques des aliments concentrés dans l'énergie produite sous forme de lait (production laitière x 0.44 UFL), en considérant que les aliments concentrés ne servent qu'à produire du lait. La production laitière « autonome – hors concentrés » est estimée à 59,44% pour le système « GA » et 60% pour le système « GP » (écarts-types respectifs : 0.51 et 0.39 pour GA et GP). L'écart d'autonomie alimentaire entre les deux systèmes n'est uniquement dû qu'à la différence de production laitière moyenne entre les deux systèmes, le système « GP » produisant plus et donc « diluant » plus la part des aliments concentrés.

La production laitière autonome (calculée à partir des apports d'aliments concentrés et des achats de fourrages) est étudiée selon les saisons : hiver et pâturage, Tableau 10. La part de la production laitière autonome dépend majoritairement de la période des forts besoins alimentaires spécifique des systèmes. En effet, la distribution des apports quotidiens d'aliments concentrés étant indexée sur le stade de lactation (première ou seconde partie de lactation) ainsi que sur la production laitière potentielle, la part de lait « autonome » diminue lorsque les apports de concentrés sont importants. Ainsi, la part de lait « autonome » est plus importante pour le système « GP » en hiver

que le système « GA » puisque les vaches laitières GP se trouvent en fin de lactation. Le phénomène s'inverse au pâturage avec une part de lait autonome plus importante pour le système « GA » que « GP ».

Tableau 10 : Analyse de la production laitière autonome selon les saisons, hiver et pâturage, des deux systèmes simulés (en %)

	GA		GP	
	hiver	pâturage	hiver	pâturage
Moyenne	56	61	62	58
Ecart-type	1	1	2	2

Au-delà de l'analyse annuelle du degré d'autonomie alimentaire et fourragère du système étudié, une autre composante majeure à étudier dans la durabilité des systèmes est sa capacité à maintenir ses performances productives et à faire face à de possibles aléas climatiques.

L'étude du bilan fourrager et des achats de fourrages (Figure 8 ; Figure 9) montre que le bilan fourrager peut être négatif plusieurs années consécutives sans pour autant que le système de production ait recours à des achats de fourrages. Les systèmes peuvent ainsi faire face à des aléas impactant la constitution des stocks en mobilisant les excédants fourragers des années précédentes. Seul le système « GP », ayant une surface fauchée plus restreinte et un bilan fourrager moyen moins excédentaire que le système « GA », doit procéder à l'achat de fourrages complémentaires en 2006, suite à trois années défavorables à la constitution des stocks. Le système « GP » achète également des fourrages complémentaires en 2010, suite à une baisse généralisée des rendements de tous les fourrages récoltés en 2009 (premières coupes précoces et tardifs, regain 2^{ème} coupe).

Outre la quantité de fourrages stockés, les conditions climatiques aléatoires affectent également la production laitière. En plus des figures décrites dans le paragraphe 7.3.1, cet impact peut s'étudier à travers la variation de la production laitière par rapport à la moyenne (Figure 15).

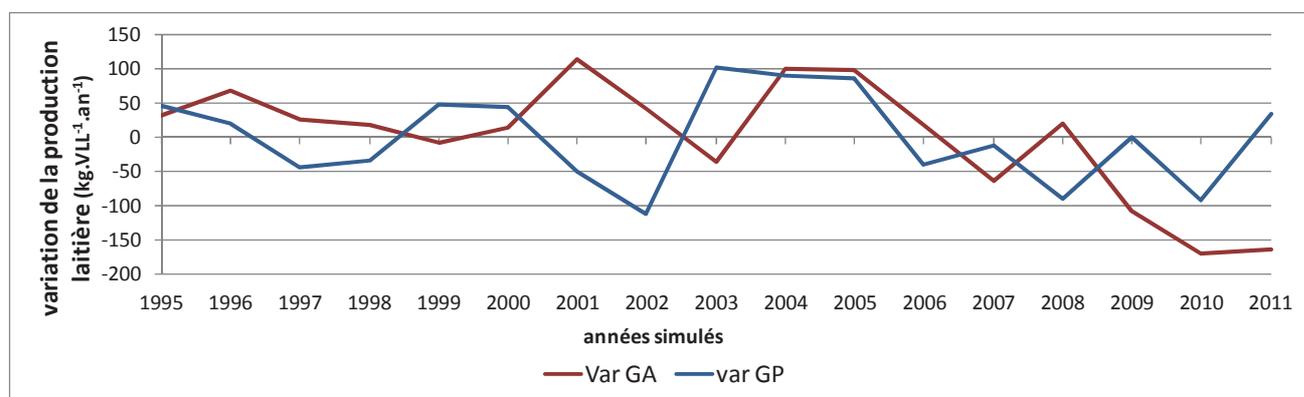


Figure 15 : Variation de la production laitière annuelle des deux systèmes (en kg.VLL-1.an-1)

La production laitière moyenne annuelle des deux systèmes présente une relative constance avec une variation comprise entre +114 et -63 kg.VLL⁻¹.an⁻¹ pour le système « GA » et -111 et + 102 kg.VLL⁻¹.an⁻¹ pour le système « GP » sur la période 1995 à 2007.

Contrairement aux attentes, les années 2003, 2004 et 2005 présentent les meilleurs niveaux de productions laitières annuelles du système « GP » malgré une pousse de l'herbe chaotique sur ces années.

La Figure 16 présente la courbe de production laitière de trois années : 2003 et 2005 ainsi que 1999, année présentant les taux d'utilisation de la biomasse au pâturage les plus faibles. Ces trois années montrent une variation importante de la production laitière sur les mois de juin, juillet et août. Les productions laitières au pâturage des années de sécheresse baissent beaucoup plus drastiquement que l'année 1999. Après avoir atteint les niveaux les plus faibles, la production laitière remonte pour atteindre un ordre de grandeur de la production proche de la production laitière potentielle. Ce phénomène est dû au basculement de l'alimentation au pâturage vers de l'alimentation à base de fourrages conservés au pâturage, déclenché par l'impossibilité de trouver une parcelle à pâturer ayant une hauteur d'herbe et biomasse suffisantes.

Ce phénomène a lieu également pour le système « GA », mais dans une moindre mesure, comme le montrent les quantités de fourrages distribués au pâturage sur la Figure 17. Le système GP distribue des fourrages au pâturage à raison de 27 jours lors de l'année 2003 et 6 jours en 2005 alors que le système GA distribue seulement sur 18 jours en 2003 et 6 jours en 2005. La durée de distribution de fourrages est plus importante pour le système « GP » en 2003, car la pression de pâturage est plus importante comparativement au système « GA », avec un effectif présent au pâturage de 51 vaches en lactation contre un effectif diminuant de 44 à 30 vaches pour le système « GA ». Cette pression est d'autant plus importante que les vaches en lactation du système « GP » ont de plus forts besoins alimentaires théoriques dus à leur stade physiologique sur cette période avec en moyenne $17,2 \text{ UFL.VLL}^{-1}.\text{j}^{-1}$ contre $14,46 \text{ UFL.VLL}^{-1}.\text{j}^{-1}$.

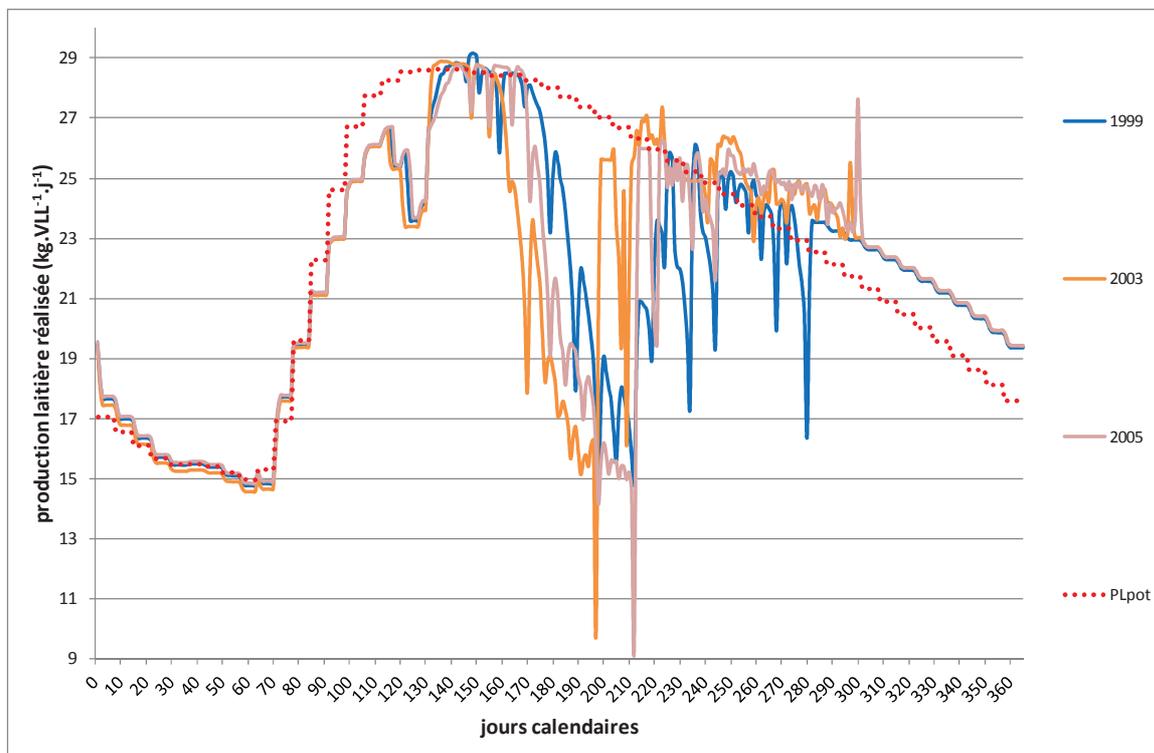


Figure 16 : productions lactières quotidiennes des années 1999, 2003 et 2005 du système GP

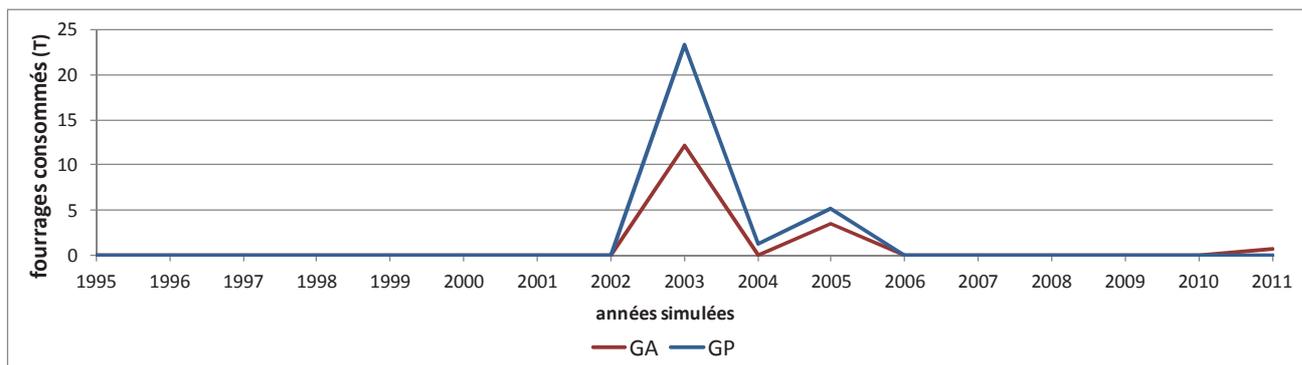


Figure 17 : Quantités de fourrages consommés par les vaches en lactation lors de la saison de pâturage pour les deux systèmes simulés (en t)

La Figure 15 montre qu'un phénomène de dégradation de la production lactière moyenne annuelle a lieu à partir de l'année 2008 pour le système « GA » alors que la production du système « GP » se maintient. La production lactière des trois dernières années est respectivement de -108, -170 et -163 kg.VLL⁻¹.an⁻¹. Cette différence de production lactière moyenne d'une année sur l'autre a lieu en période d'alimentation en stabulation comme le montre la Figure 18. Lors de la rentrée-étable de ces quatre années, la production lactière chute drastiquement (de 4 à 6 kg.VLL⁻¹.an⁻¹) alors que les niveaux de production au pâturage avant la rentrée-étable étaient proches de la production lactière potentielle des animaux.

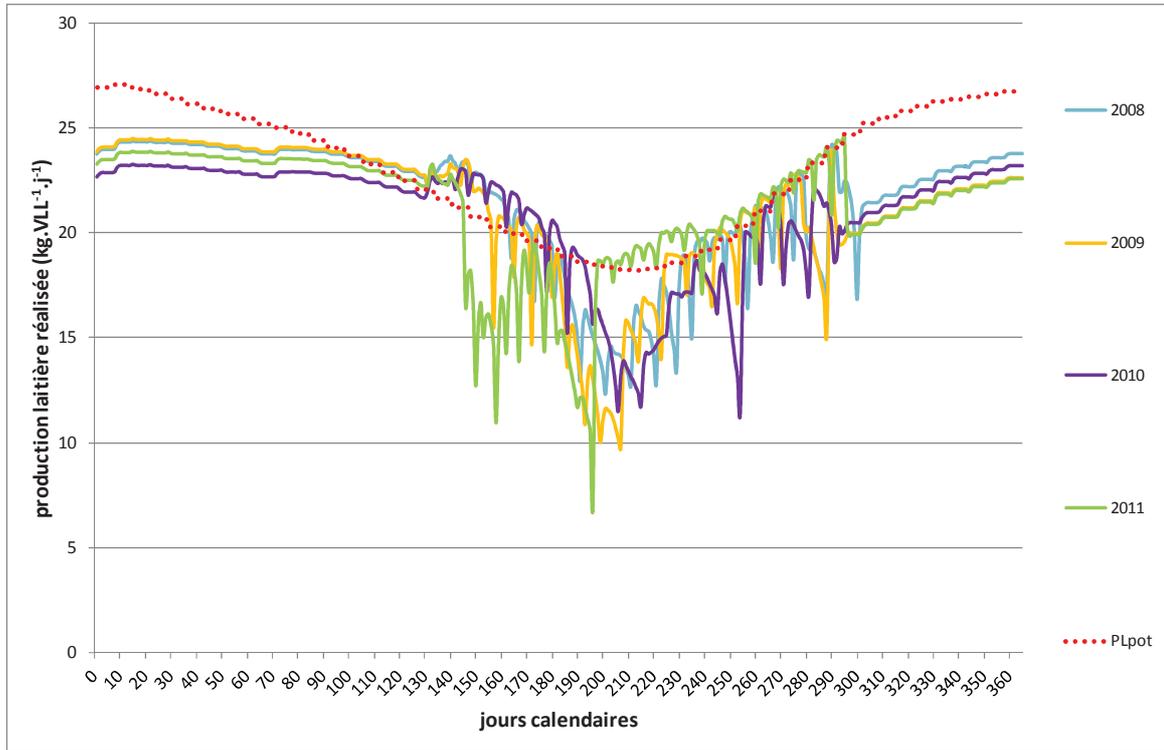


Figure 18 : productions laitières quotidiennes des années 2008 à 2011 du système "GA"

Cette chute de lait est provoquée par une dégradation de la digestibilité des fourrages récoltés et alloués au lot des vaches en lactation. Comme le montre la Figure 10, la digestibilité des fourrages récoltés de 2009 à 2011 en première coupe précoce oscille entre 0.65 et 0.63, soit une valeur UFL comprise entre 0.76 et 0.74 (la digestibilité moyenne du fourrage entre 1995 et 2002 est de 0.66 soit une valeur UFL moyenne de 0.79).

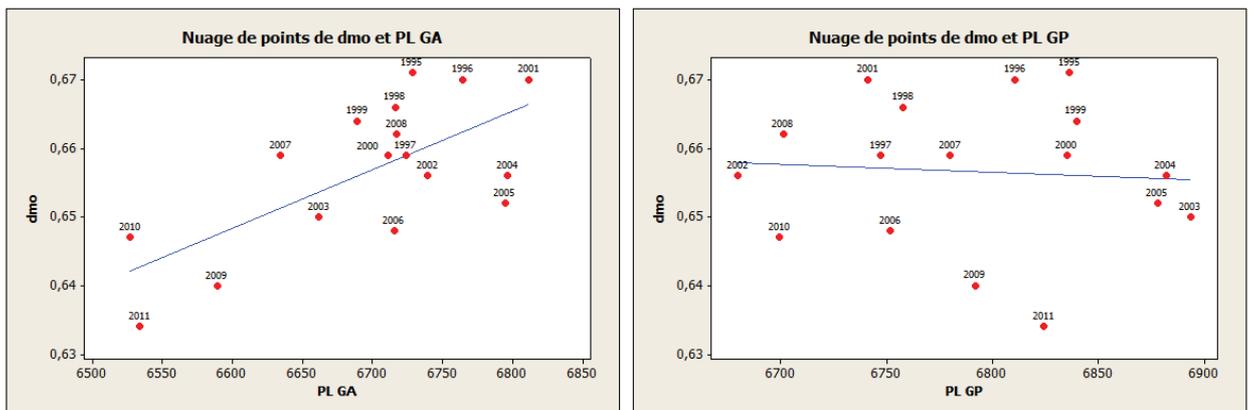


Figure 19 : Analyse des relations entre digestibilité des fourrages de première coupe "bonne qualité" et la production laitière annuelle par vache selon les années simulées (en kg.VLL-1.an-1)

La Figure 19 montre bien qu'il existe une relation entre la digestibilité des fourrages de première coupe « bonne qualité » avec la production laitière annuelle par vache pour le système « GA », contrairement au système « GP ». Nous pouvons aussi clairement identifier la baisse de production laitière du système « GA » en relation avec de moins bonnes digestibilités pour les années 2009, 2010 et 2011.

Plus généralement, la Figure 10 montre que la digestibilité des fourrages récoltés en première coupe présente deux phases distinctes : 1995 à 2002 et 2003 à 2011. La période 2003 à 2011 affiche une diminution tendancielle des valeurs de digestibilité des deux types de fourrages « première coupe » comparativement à la période 1995 à 2002. Cette tendance est plutôt inverse sur la digestibilité des regains.

Conclusions sur les simulations « séries climatiques longues » des deux systèmes contrastés

Selon les résultats présentés ci-dessus, les deux systèmes contrastés étudiés montrent **un degré d'autonomie fourragère très important** : le système « GA » n'a jamais recours à l'achat de fourrages complémentaires tandis que le système « GP » en achète ponctuellement.

Compte-tenu de la planification du système fourrager, le système « GP » est ainsi plus sensible à la quantité de stocks récoltés, variable d'une année sur l'autre en fonction des conditions climatiques. Cependant, en analysant l'évolution des productions laitières et leur variation d'une année sur l'autre, **le système « GP » est celui dont la production est la plus constante et la moins sensible aux aléas**, à l'échelle de la production annuelle. Cette constance est assurée par plusieurs phénomènes. Tout d'abord, le système « GP » est caractérisé par des vaches laitières ayant de forts besoins alimentaires au cours de la saison de pâturage. Or **les règles de gestion du pâturage mises en place permettent d'assurer une constance de l'offre herbagère en qualité** et en quantité comme le montre la Figure 14. En cas d'aléas climatiques impactant trop fortement la pousse de l'herbe comme ce fut le cas au cours de l'été 2003 et 2005, la disponibilité en herbe pour le pâturage est trop insuffisante et l'alimentation à base de fourrages conservés permet de palier momentanément à ce manque. Ainsi, ce système de règles permet de limiter l'impact sur la production laitière.

Les résultats développés ci-dessus montrent également que **les conditions climatiques affectent fortement la qualité des stocks constitués** avec notamment une dégradation de la digestibilité des fourrages récoltés en premières coupes sur les trois dernières années de simulation. Ainsi, **les systèmes dont les vaches en lactation ont de plus forts besoins en alimentation hivernale, comme le système étudié « GA », sont plus sensibles à cette variation**, se répercutant sur la quantité de lait produite annuelle (Figure 19). Le système « GP », quant à lui, ne présente pas cette sensibilité à la digestibilité variable des fourrages conservés puisque la ration offerte en hiver permet de dépasser la production laitière potentielle, la majeure partie de la saison hivernale et ce, sur toutes les années de simulation (Figure 7).

Une autre conclusion dérivant de l'analyse des résultats relatifs au pâturage est la **sous - utilisation de l'offre en herbe au pâturage**. En effet, en regard des taux d'utilisation relativement faibles de la biomasse par les vaches laitières au pâturage, y compris dans le système « GP », l'une des marges de manœuvre possibles pour améliorer les performances de ces systèmes serait d'augmenter ce taux d'utilisation.

L'augmentation de l'utilisation de l'herbe au pâturage peut s'effectuer à travers plusieurs leviers comme l'augmentation du chargement au pâturage ou la diminution des apports de concentrés au pâturage afin de favoriser l'ingestion de l'herbe.

CHAPITRE VIII

**8 INCIDENCE DU CHARGEMENT ET DE
LA QUANTITE D'ALIMENTS
CONCENTRES SUR L'UTILISATION
DE L'HERBE, LA PRODUCTION
LAIETIERE ET L'AUTONOMIE DU
SYSTEME DE PRODUCTION**

8.1 Quelles sont les marges de manœuvres pour maximiser la valorisation de l'herbe ?

Les résultats des simulations des deux systèmes explorés dans le chapitre précédent montrent que les deux systèmes sont autonomes ou quasiment autonomes pour le système GP d'un point de vue fourrager et que leur degré d'autonomie alimentaire dépend de la quantité annuelle d'aliments concentrés distribués.

L'analyse des performances animales et de leurs variations interannuelles indique que l'élaboration des performances laitières et leur maintien au cours du temps est sensible à la qualité de la ration offerte lors de la période de forts besoins alimentaires. Les courbes de productions laitières quotidiennes des deux systèmes et les courbes de la valeur énergétique moyenne de l'herbe ingérée au cours de la saison de pâturage présentées dans le chapitre précédent montrent que l'offre herbagère permet d'atteindre des performances laitières proches du niveau de potentiel laitier attendu au printemps pour le système « GP » et à l'automne pour le système « GA ». Cependant, les faibles taux d'utilisation de la biomasse de l'herbe pâturée par les vaches laitières des deux systèmes, indiquent des marges de manœuvre pour améliorer l'utilisation de l'offre herbagère.

L'augmentation du chargement global du troupeau doit permettre d'améliorer l'utilisation de l'herbe au pâturage tout en augmentant la quantité de lait produite à l'échelle du système. L'analyse de l'impact d'une augmentation du chargement sur l'ensemble du système permet d'étudier les compromis qu'il est possible d'atteindre entre amélioration du niveau de production du système et valorisation des ressources provenant des prairies, et les conséquences sur le degré d'autonomie fourragère et la production laitière autonome. L'augmentation de la production (par le nombre de vaches, ou par le niveau de production par animal) peut constituer une stratégie mise en œuvre par certains producteurs pour améliorer l'efficacité économique du système dans le contexte de sortie des quotas et dans la mesure où la valorisation fromagère du lait peut offrir des débouchés.

A l'inverse, réduire les intrants alimentaires, en particulier le concentré, peut constituer une autre stratégie pour améliorer la valorisation de l'herbe et, par là, l'efficacité économique du système. Nous avons ainsi fait le choix de **diminuer les apports d'aliments concentrés** afin d'améliorer le degré d'autonomie alimentaire mais aussi **d'accroître la valorisation du potentiel fourrager** et herbager de l'exploitation. De plus, expérimenter l'impact d'une diminution des apports d'aliments concentrés sur l'ensemble du système de production permet de tester la robustesse des systèmes et leur capacité à faire face à un changement de contraintes, ainsi qu'à maintenir l'équilibre entre les composantes du système de production.

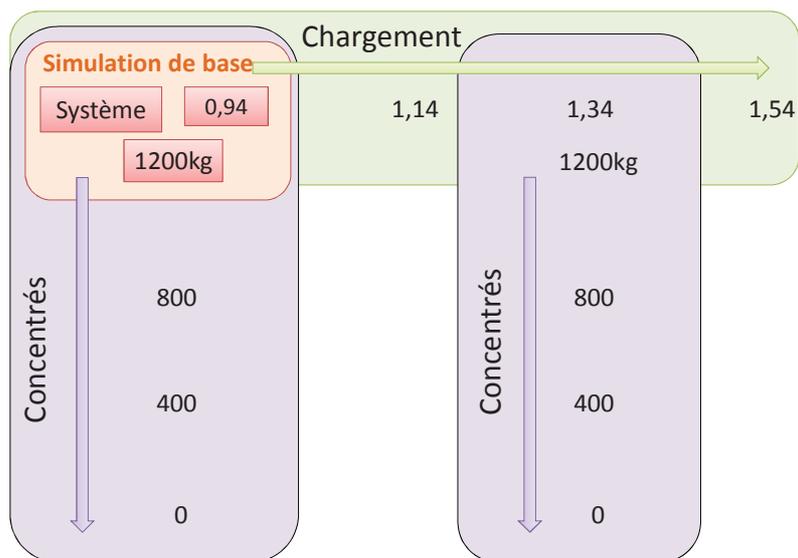


Figure 1 : Plan expérimental des simulations effectuées (chargement en UGB.ha⁻¹ et concentrés en kg.VLL⁻¹.an⁻¹)

Nous avons ainsi mis au point un plan d'expérimentation permettant d'étudier l'augmentation du chargement d'un part, et la diminution des apports de concentrés, d'autre part, présenté dans la Figure 1. Ainsi, nous sommes repartis des deux systèmes décrits et étudiés sur une série climatique longue du chapitre 7, que nous nommons « simulation de base » (GA et GP). Ces deux systèmes sont, entre autres, décrits par un niveau d'apport d'aliments concentrés de 1200kg.VL⁻¹.an⁻¹ et un chargement global de 0.94 UGB.ha⁻¹, correspondant à un effectif de 51 vaches laitières.

Nous avons simulé, toutes choses égales par ailleurs et avec un apport de concentré de 1200 kg.VLL⁻¹, quatre niveaux croissants de chargement : 1.14, 1.34 et 1.54 UGB.ha⁻¹ correspondant respectivement à un effectif de 62, 72 et 82 vaches laitières. La gestion des stocks fourragers ne présente pas de biais par rapport à l'effet étudié, puisque la capacité de stockage est exprimée en t.UGB⁻¹.

Nous avons ensuite simulé, toutes choses égales par ailleurs, quatre niveaux d'apports d'aliments concentrés avec 1200, 800, 400 et 0 kg.VLL⁻¹.an⁻¹ dans la ration hivernale et au pâturage. Ces niveaux ont été testés sur les systèmes présentant le chargement plus faible, 0.94 UGB.ha⁻¹ et sur ceux présentant un chargement plus important avec 1.34 UGB.ha⁻¹. En effet, l'objectif sous-jacent est alors d'observer l'impact de contraintes de production plus strictes sur un système plus intensif et plus productif et donc, présentant moins de marge de sécurité dans le système fourrager et herbager.

Ainsi la mise en place de ce plan expérimental permet d'élaborer des lois de réponses des différentes composantes du système de production en fonction de l'évolution des apports de concentrés ou du chargement. Il permet d'explorer différentes situations et niveaux de compromis entre l'augmentation des niveaux de productions des vaches et de valorisation du potentiel productif des ressources offertes par les prairies qui peut se faire au détriment des niveaux d'autonomie fourragère.

Le plan expérimental a été testé sur les deux systèmes GA et GP ainsi que sur deux séries climatiques : 1993-1999 et 2005-2011. Comme expliqué précédemment dans le chapitre 6, nous avons choisi ces deux séries climatiques pour leur antagonisme : 1993-1999 ne présente pas d'événement climatique particulier, à l'opposé de la série climatique 2005-2011 plus riche en aléas. L'utilisation de ces deux séries climatiques permet d'étudier la tension appliquée au système de production par l'augmentation de contraintes (augmentation de chargement ou diminution des concentrés) et le comportement du système de production en réponse à ces contraintes sur des années climatiques « normales » ou difficiles. Ainsi, nous pouvons étudier les marges de sécurité nécessaires au maintien de l'équilibre entre les différentes composantes du système de production. Les séries climatiques utilisées sont issues des données météorologiques de la station de Marcenat (Latitude: 45° 18' 25" Nord, Longitude: 2° 49' 36" Est, altitude moyenne 1105m), Massif central.

Dans ce chapitre, nous avons concentré l'analyse des résultats sur quelques variables du système de production, à savoir les variables liées à la production laitière, l'utilisation de l'herbe et l'autonomie fourragère et alimentaire. Nous n'avons pas étudié les variables reliées aux fauches, puisque le parcellaire et les usages liés à la fauche restent identiques dans le plan expérimental.

Afin de comprendre le comportement des systèmes simulés face à des changements de contraintes, nous avons effectué des analyses de variance à un facteur contrôlé (Minitab™ V15). Nous avons ainsi testé les effets des contraintes appliquées : chargement ou concentré, ainsi que parfois l'effet « système » (GA ou GP) ou l'effet « série climatique ». Ces ANOVA ont été réalisées sur quelques variables pertinentes reliées à la production laitière, à la valorisation de l'herbe ou encore à l'autonomie fourragère ou alimentaire.

8.2 Incidence du chargement

8.2.1 Production laitière

L'augmentation du chargement n'affecte pas significativement le niveau de production laitière moyenne réalisée par vache du système « GA » (Tableau 1 et la Figure 2). *A contrario*, l'augmentation du chargement favorise la production laitière moyenne réalisée par vache dans le système « GP » avec un accroissement de près de 110 kg de lait entre le chargement le plus faible et le plus élevé (effet faiblement significatif voir non significatif avec une p-value respectivement de 0.041 et 0.081 pour les deux séries climatiques). La production moyenne réalisée varie moins d'une année sur l'autre, selon les différents chargements, pour le système « GP » que le système « GA » (les écart-types associés sont plus faibles pour le système GP que GA).

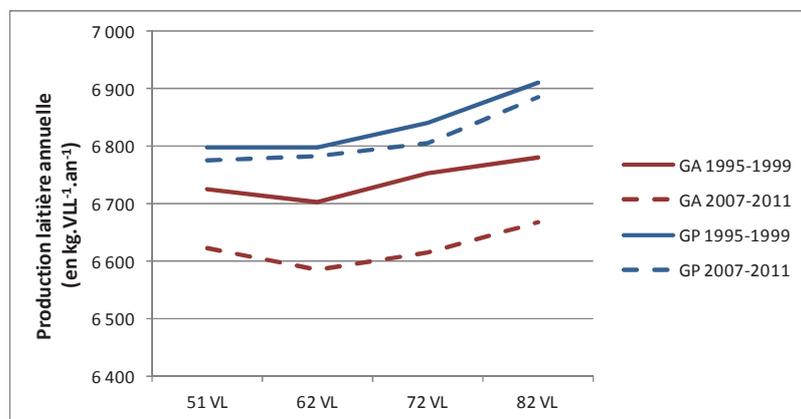


Figure 2 : Effet du chargement sur les niveaux de production laitière moyenne réalisée par vache dans les deux systèmes, GA et GP, sur les deux séries climatiques étudiées (en kg.VL⁻¹.an⁻¹)

La Figure 4 indique que les différentes productions laitières quotidiennes ne varient quasiment pas d'un niveau de chargement à l'autre : elles ne varient pas du tout en période l'alimentation hivernale et présentent quelques variations au pâturage, principalement en été et en automne (à partir du jour 210, soit fin juillet), pour les deux systèmes et les deux séries climatiques étudiées. Les graphiques a et b représentant le système GA sur les deux périodes indiquent bien que la production laitière hivernale n'atteint jamais la production laitière potentielle.

La comparaison visuelle des graphiques a et b de la Figure 4 indique que la production laitière réalisée lors des premiers temps après la mise à l'herbe est plus intense et persistante lors de la période 1995-1999 que celle de 2007-2011. La production laitière réalisée dépasse plus, et plus longtemps, la production laitière potentielle sur la série climatique 1995-1999. *A contrario*, ces graphiques montrent également que la production laitière réalisée sur le pâturage automnal de la série climatique 2007-2011 atteint des niveaux plus importants jusqu'à la rentrée étable avec 24 kg.VL⁻¹.j⁻¹. A la même période, la production laitière de la période 1995-1999 plafonne à 22 kg.VL⁻¹.j⁻¹ et diminue peu avant la rentrée étable.

Les graphiques c et d de la Figure 4, représentant le système « GP », montrent que l'offre énergétique provenant des fourrages et des concentrés autorisés permet aux vaches en lactation de produire plus que la production laitière potentielle sur la majeure partie de la période hivernale, quel que soit le chargement ou la série climatique. La production laitière printanière est plus soutenue et persistante sur la période 1995-1999 que sur la période 2007-2011 qui présente un léger décrochement par rapport à la production laitière potentielle. La production laitière d'été (fin juillet - début août) de 1995-1999 marque une chute plus importante que celle de 2007-2011 avec un écart de $2\text{kg.VLL}^{-1}.\text{j}^{-1}$. Par ailleurs, les niveaux de production laitière automnale semblent favorisés par l'offre herbagère sur la période 2007-2001 par rapport à 1995-1999, particulièrement pour le chargement très élevé ($1.54\text{ UGB}.\text{ha}^{-1}$).

Ces résultats pourraient ainsi indiquer que la période 1995-1999 présente une pousse de l'herbe printanière plus favorable à la production laitière alors que la période 2007-2011 présente des conditions climatiques plus favorables au pâturage d'automne. Ces quatre graphiques semblent également indiquer que la production laitière au pâturage est même favorisée pour le niveau de chargement le plus élevé, soit $1.54\text{ UGB}.\text{ha}^{-1}$.

Par ailleurs, la Figure 2 permet de mettre en évidence que le système « GP » ne montre pas de sensibilité au facteur « série climatique » contrairement au système « GA » où les productions laitières de la série 2007-2011 sont bien inférieures à celles de 1995-1999 (un écart moyen de 115kg de lait par an et par vache).

L'élévation du chargement permet d'augmenter très significativement la production laitière par unité de surface, soit par hectare (Tableau 2). La production laitière augmente linéairement avec l'accroissement du chargement, vu que ce dernier n'a pas ou peu d'impact sur le niveau de production moyen individuel. Cette relation linéaire est quasiment identique entre les deux systèmes et les deux séries climatiques mais nous pouvons noter une augmentation légèrement supérieure pour le système GP, conséquence de l'augmentation significative de la production laitière par vache.

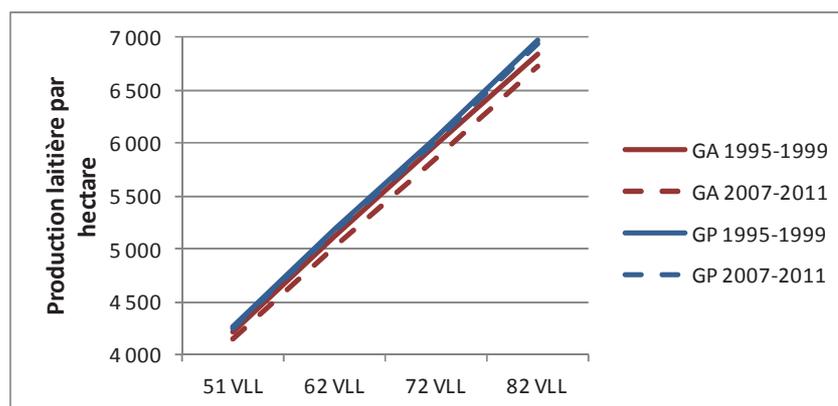
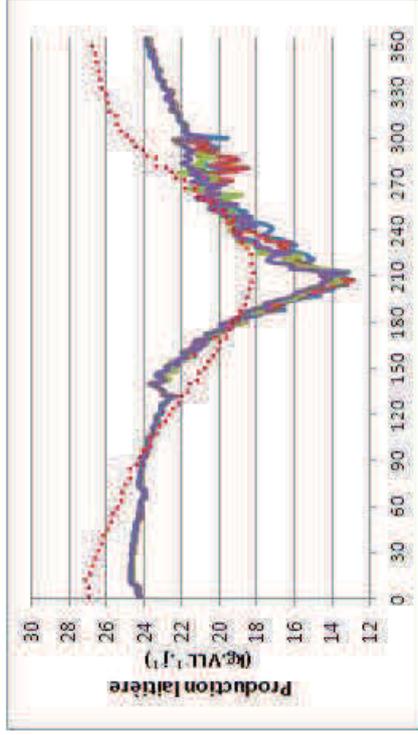
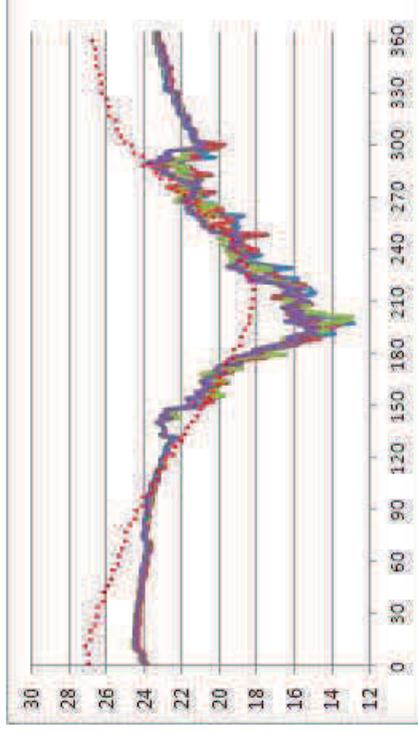


Figure 3 : Impact des chargements sur la production laitière par hectare des deux systèmes étudiés

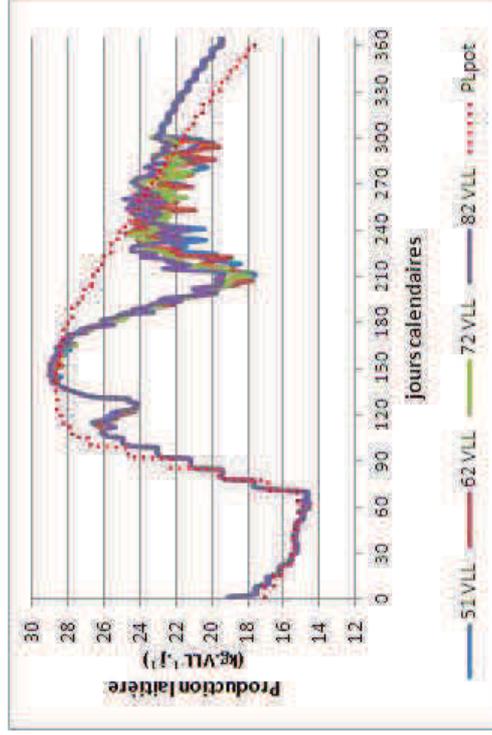
a) Système GA 1995-1999



b) Système GA 2007-2011



c) Système GP 1995-1999



d) Système GP 2007-2011

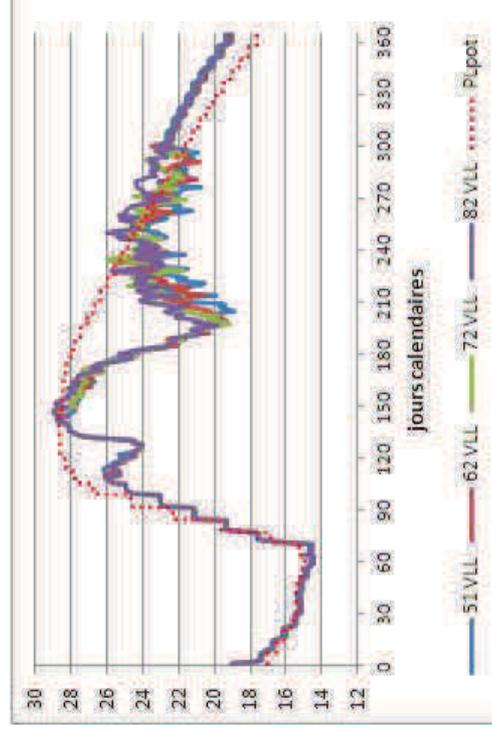


Figure 4 : Productions laitières quotidiennes par vache des deux systèmes étudiés sur les deux séries climatiques (en kg.VLL⁻¹.j⁻¹)

Tableau 1 : Productions laitières moyennes réalisées par vache laitière des deux systèmes étudiés sur les deux séries climatiques (en kg.VL⁻¹.an⁻¹)

	0.94 (51VL)		1.14 (62VL)		1.34 (72VL)		1.54 (82VL)	
	GA	GP	GA	GP	GA	GP	GA	GP
Moyenne	6724	6798	6702	6798	6753	6841	6780	6911
2007-2011	6623	6776	6585	6783	6616	6807	6669	6885
Ecart-type	27	43	73	50	99	66	95	87
2007-2011	88	61	119	63	126	86	109	60
1995-1999	6689 – 6765	6747- 6840	6636 - 6800	6719 – 6844	6613 – 6852	6768 – 6922	6639 – 6894	6791 – 6985
2007-2011	6516 - 6712	6690 - 6827	6404 - 6682	6683 – 6846	6456 - 6784	6672 – 6907	6518 - 6793	6821 – 6980

Tableau 2 : Productions laitières moyennes réalisées par hectare des deux systèmes étudiés sur les deux séries climatiques (en kg.ha⁻¹)

	0.94 (51VL)		1.14 (62VL)		1.34 (72VL)		1.54 (82VL)	
	GA	GP	GA	GP	GA	GP	GA	GP
Moyenne	4218	4265	5111	5184	5981	6058	6838	6970
2007-2011	4154	4251	5022	5173	5859	6028	6726	6945
Ecart-type	17	27	56	38	87	58	95	88
2007-2011	55	38	91	48	112	76	110	60
1995-1999	4196 – 4243	4233 – 4291	5060 – 5186	5123 – 4291	5856 – 6068	5994 – 6130	6696 – 6954	6849 – 7046
2007-2011	4088 – 4215	4197 – 4283	4884 – 5095	5097 – 5221	5717 – 6008	5908 – 6117	6579 – 6851	6880 – 7040

8.2.2 Utilisation de l'herbe pâturée

L'augmentation du chargement n'influence que très peu les niveaux moyens d'ingestion d'herbe au pâturage des deux systèmes (Tableau 3 et Tableau 4). Le chargement favorise même légèrement l'ingestion aux vues de l'accroissement léger des quantités ingérées mais seul l'accroissement du système « GP » est significatif ($P=0.000$ pour 1995-1999 et $P=0.056$ pour 2007-2011). De même, le chargement n'influence pas la variation interannuelle des quantités d'herbe ingérée qui reste faible et stable avec des écarts-types faibles. Cependant, cette variation est plus importante sur la période 2007-2011 que sur la période 1995-1999 marquée par des écarts-types plus importants dans les deux systèmes. L'augmentation du chargement, affectant également les effectifs des autres lots, n'a pas d'impact significatif sur les quantités moyennes d'herbe ingérée à l'échelle du troupeau ni sur les variations interannuelles qui restent faibles mais plus importantes pour la deuxième série climatique.

L'augmentation du chargement a des effets bénéfiques très significatifs sur la valeur UFL moyenne de l'herbe ingérée par les vaches en lactation au cours de la saison de pâturage (Tableau 5 et Tableau 6), avec des valeurs comprises entre 0.83 et 0.84 pour les deux systèmes avec un chargement de 0.94 UGB.ha⁻¹ et 0.86 et 0.87 pour 1.54 UGB.ha⁻¹ (GA et GP 1995-1999 : $P=0.000$ et $P=0.000$; GA et GP 2007-2011 : $P=0.001$ et $P=0.002$). La valeur UFL moyenne présente peu de variation d'une année sur l'autre (écart-type compris entre 0.01 et 0.03). Cette valeur UFL moyenne de l'herbe ingérée atteint même 0.90 au cours de la saison de pâturage de 2007 pour le système « GA » avec le niveau de chargement le plus élevé. Les valeurs UFL moyennes du système « GP » semblent inférieures aux valeurs du système « GA » (moyennes significativement différentes pour la série climatique 1995-1999 et non significativement différentes pour la deuxième série climatique avec respectivement un test-t : $p=0.003$ et $p=0.330$).

L'augmentation de la valeur UFL de l'herbe ingérée par les vaches laitières est expliquée par le fait que la disponibilité de l'herbe au pâturage diminue plus vite sous une pression de pâturage plus importante. Les temps de séjour des animaux sur les parcelles sont réduits pour les chargements plus élevés comparativement aux chargements plus faibles. Plus la pression de pâturage est importante et plus les animaux sont sélectifs dans le couvert végétal à ingérer. Malgré l'augmentation des effectifs des autres lots du troupeau (25 génisses par catégories pour le chargement de 1.54 UGB.ha⁻¹ contre 16 pour le chargement le plus faible), la valeur moyenne UFL de l'herbe ingérée par ces lots n'évolue pas significativement. L'augmentation des effectifs n'est pas suffisante et ne compense pas l'offre herbagère pléthorique. La règle déclenchant la sortie de parcelle d'un de ces lots est systématiquement le temps de

séjour maximum atteint, à savoir 15 jours dans ces simulations. Ces animaux donc ne pâturent jamais jusqu'à la hauteur d'herbe objectif fixée.

Le taux d'utilisation de la biomasse des parcelles pâturées par les vaches en lactation augmente très significativement ($P=0.001$ pour le système « GA » sur la période 1995-1999 et $P=0.000$ sur les trois autres simulations) (Tableau 7 et Tableau 8). L'utilisation de la biomasse produite sur les parcelles réservées aux vaches en lactation augmente avec une pression de pâturage plus intense. Elle atteint respectivement 39% et 42% pour les deux séries climatiques pour la simulation $1.54 \text{ UGB} \cdot \text{ha}^{-1}$ pour le système « GA » et 36 et 39% pour ce même chargement et pour le système « GP ». Les taux d'utilisation des deux chargements les plus élevés ($1.34 \text{ UGB} \cdot \text{ha}^{-1}$ et $1.54 \text{ UGB} \cdot \text{ha}^{-1}$) atteignent les valeurs optimales définies par Joven *et al.*, (2007) par rapport au compromis production biodiversité, qui se situent entre 35 et 45% d'utilisation de la biomasse produite pour des pâtures et des fauches dont la flore est moyennement à fortement productive.

Les taux d'utilisation du système « GA » semblent plus élevés que ceux du système « GP » malgré l'effet « système » non significatif selon l'analyse de variance. Cette différence est cohérente avec la comparaison des deux systèmes effectuée dans le chapitre 7 où les taux d'utilisation du système « GP » sont plus faibles que ceux de « GA » du fait d'une surface pâturable par les vaches en lactation plus importante, malgré le stade de lactation des animaux « GP » en début de lactation. L'augmentation de la pression de pâturage par l'accroissement du chargement ne permet pas de compenser cet écart.

Par ailleurs, les taux d'utilisation des deux systèmes semblent plus élevés sur la série climatique 2007-2011 (effet « séries climatiques » non significatif). Cette différence entre les deux périodes pourrait être expliquée par une offre herbagère plus chaotique et des périodes de manque d'herbe à pâturer sur 2007-2011. A pression de pâturage identique, la biomasse produite étant réduite, le taux d'utilisation est alors supérieur à la période 1995-1999, années ne présentant pas d'aléas climatiques. Cette hypothèse pourrait être confirmée par la distribution de fourrages conservés en période de pâturage. Seules les vaches en lactation des simulations 2007-2011 du système « GA » reçoivent des fourrages conservés au pâturage.

Tableau 3 : Quantité moyenne d'herbe ingérée par vache au cours de la saison de pâturage selon les chargements pour le système "GA" (en kg MS.VLL-1.j-1 et kg MS.UGB-1.j-1)

	0.94 (51VL)		1.14 (62VL)		1.34 (72VL)		1.54 (82VL)	
	Qlh (VL)	Qlh (Troup.)						
Moyenne	13.95	11.72	13.95	11.72	14.02	11.77	14.06	11.79
2007-2011	13.79	11.67	13.76	11.66	13.83	11.69	13.86	11.69
Ecart-type	0.15	0.10	0.21	0.11	0.19	0.12	0.11	0.11
2007-2011	0.21	0.18	0.24	0.20	0.19	0.14	0.24	0.21
1995-1999	13.69 – 14.05	11.62 – 11.87	13.61 – 14.12	11.58 – 11.83	13.73 – 14.24	11.65 – 11.91	13.90 – 14.19	11.69 – 11.99
2007-2011	13.48 – 14.07	11.41 – 11.84	13.35 – 13.94	11.32 – 11.82	13.59 – 14.05	11.47 – 11.84	13.57 – 14.07	11.45 – 11.93

Tableau 4 : Quantité moyenne d'herbe ingérée par vache au cours de la saison de pâturage selon les chargements pour le système "GP" (en kg MS.VLL-1.j-1 et kg MS.UGB-1.j-1)

	0.94 (51VL)		1.14 (62VL)		1.34 (72VL)		1.54 (82VL)	
	Qlh (VL)	Qlh (Troup.)						
Moyenne	14.84	11.87	14.91	11.91	14.97	11.93	15.14	12.06
2007-2011	14.96	11.96	15.06	12.03	15.12	12.07	15.26	12.16
1995-1999	0.08	0.08	0.08	0.08	0.06	0.11	0.08	0.07
2007-2011	0.13	0.05	0.11	0.05	0.23	0.11	0.14	0.09
1995-1999	14.75 – 14.94	11.79 – 11.99	14.87 – 14.99	11.81 – 12.02	14.92 – 15.07	11.75 – 12.01	15.01 – 15.22	11.98 – 12.17
2007-2011	14.84 – 15.16	11.89 – 12.01	14.96 – 15.24	11.96 – 12.08	14.83 – 15.44	11.95 – 12.19	15.01 – 15.35	12.06 – 12.25

Tableau 5 : Valeur UFL moyenne de l'herbe ingérée au cours de la saison de pâturage par les différents lots du troupeau du système « GA » selon les chargements

	0.94 (51VL)			1.14 (62VL)			1.34 (72VL)			1.54 (82VL)		
	VLL	VLT	G									
Moyenne	0.84	0.83	0.87	0.85	0.83	0.87	0.86	0.83	0.87	0.87	0.84	0.87
2007-2011	0.84	0.83	0.86	0.85	0.83	0.86	0.86	0.84	0.87	0.87	0.84	0.87
Ecart-type	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02
2007-2011	0.01	0.03	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.03	0.01	0.03	0.01	0.02
1995-1999	0.84	0.81	0.85	0.83	0.81	0.85	0.87	0.82	0.85	0.87	0.81	0.85
2007-2011	0.85	0.84	0.89	0.88	0.85	0.89	0.88	0.84	0.88	0.88	0.87	0.89
Min - Max	0.83	0.81	0.84	0.84	0.80	0.84	0.85	0.81	0.84	0.86	0.81	0.84
2007-2011	0.85	0.88	0.88	0.87	0.86	0.88	0.87	0.88	0.88	0.90	0.88	0.88

Tableau 6 : Valeur UFL moyenne de l'herbe ingérée au cours de la saison de pâturage par les différents lots du troupeau du système « GP » selon les chargements

	0.94 (51VL)			1.14 (62VL)			1.34 (72VL)			1.54 (82VL)		
	VLL	VLT	G									
Moyenne	0.83	0.95	0.84	0.84	0.95	0.84	0.85	0.95	0.85	0.86	0.95	0.84
2007-2011	0.83	0.94	0.83	0.84	0.94	0.83	0.85	0.94	0.84	0.87	0.94	0.84
Ecart-type	0.01	0.03	0.03	0.01	0.03	0.03	0.01	0.03	0.02	0.01	0.03	0.03
2007-2011	0.01	0.03	0.02	0.01	0.03	0.02	0.02	0.03	0.02	0.01	0.03	0.02
1995-1999	0.81	0.92	0.80	0.83	0.92	0.80	0.84	0.92	0.82	0.85	0.92	0.80
2007-2011	0.84	0.99	0.87	0.84	0.99	0.87	0.86	0.99	0.87	0.87	0.99	0.87
Min - Max	0.81	0.91	0.82	0.83	0.91	0.82	0.83	0.91	0.82	0.85	0.91	0.82
2007-2011	0.85	0.98	0.87	0.86	0.98	0.87	0.87	0.98	0.87	0.88	0.98	0.87

Tableau 7 : Taux d'utilisation moyenne de la biomasse sur les parcelles pâturées par les vaches laitières et la quantité de fourrages distribuée au pâturage pour les vaches en lactation du système « GA » selon les chargements (en t)

	0.94 (51VL)		1.14 (62VL)		1.34 (72VL)		1.54 (82VL)	
	Tx util.	Fourrages	Tx util.	Fourrages	Tx util.	Fourrages	Tx util.	Fourrages
Moyenne	0.23	0	0.28	0	0.34	0	0.39	0
2007-2011	0.25	0.14	0.31	0.50	0.36	0	0.42	0.47
Ecart-type	0.04	0	0.05	0	0.05	0	0.06	0
2007-2011	0.03	0.30	0.03	1.11	0.04	0	0.03	1.05
1995-1999	0.18 - 0.27	0	0.22 - 0.34	0	0.28 - 0.39	0	0.32 - 0.45	0
2007-2011	0.20 - 0.28	0 - 0.68	0.25 - 0.34	0 - 2.48	0.30 - 0.39	0 - 0	0.39 - 0.47	0 - 2.35

Tableau 8 : Taux d'utilisation moyenne de la biomasse sur les parcelles pâturées par les vaches laitières et la quantité de fourrages distribuée au pâturage pour les vaches en lactation du système « GP » selon les chargements (en t)

	0.94 (51VL)		1.14 (62VL)		1.34 (72VL)		1.54 (82VL)	
	Tx util.	Fourrages						
Moyenne	0.20	0	0.25	0	0.30	0	0.36	0
2007-2011	0.23	0	0.29	0	0.34	0	0.39	0
1995-1999	0.03	0	0.03	0	0.04	0	0.05	0
2007-2011	0.03	0	0.04	0	0.05	0	0.04	1.19
1995-1999	0.15 - 0.22	0	0.20 - 0.28	0	0.24 - 35	0	0.29 - 0.42	0
2007-2011	0.18 - 0.27	0	0.23 - 0.33	0	0.27 - 0.40	0	0.33 - 0.42	0 - 2 ;65

8.2.3 Autonomie

L'augmentation du chargement, toutes choses égales par ailleurs, c'est-à-dire pour une même surface fauchée et pâturée, a un impact très fort et très significatif sur l'état des stocks fourragers et sur le bilan fourrager des deux systèmes, quelle que soit la série climatique simulée (Figure 5 et Tableau 9). Les bilans fourragers sont positifs jusqu'au niveau de chargement 1.14 UGB.ha⁻¹ pour les deux systèmes. Au-delà de ce chargement, les systèmes présentent des stocks fourragers en moyenne déficitaires, à l'exception du système « GA » sur la période 1995-1999 qui conserve un bilan fourrager très légèrement positif pour le niveau de chargement 1.34 UGB.ha⁻¹. Ceci est cohérent avec les résultats du Tableau 10 et du Tableau 11 montrant que les achats de fourrages deviennent supérieurs aux ventes au-delà du chargement 1.34 UGB.ha⁻¹ inclus. L'équilibre entre les achats de fourrages complémentaires (catégorie bonne qualité) et les ventes de fourrages excédentaires (catégorie moins bonne qualité) s'effectue entre les niveaux de chargement 1.14 et 1.34 UGB.ha⁻¹.

Les bilans fourragers de la série climatique 2007-2011 des deux systèmes sont plus faibles que ceux de la période 1995-1999, ce qui est cohérent avec l'étude des deux systèmes sur les longues séries climatiques montrant que les rendements de 2002 à 2011 sont inférieurs à ceux de 1995 à 2002, particulièrement les premières coupes. De même, les variations interannuelles sont plus importantes sur la deuxième série climatique que sur la première, indiquant une alternance d'années favorables à la constitution de stocks (2007, 2008) et d'autres, bien moins favorables (2009, 2011).

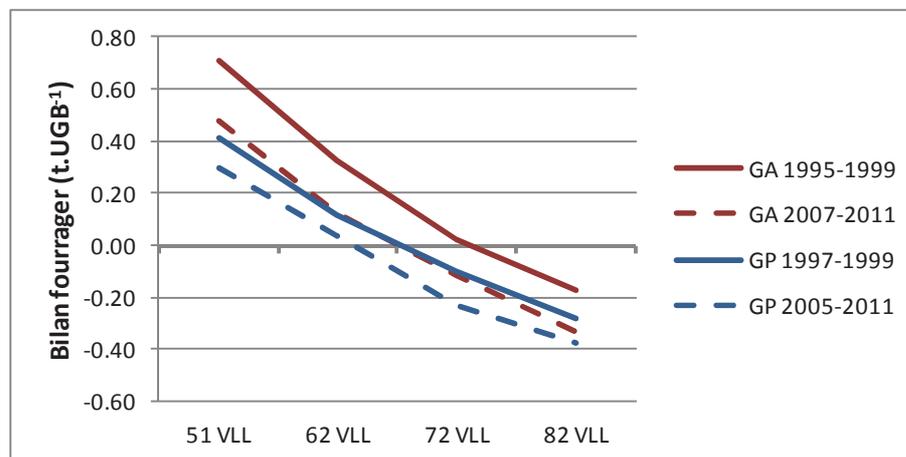


Figure 5 : Impact du chargement sur le bilan fourrager des deux systèmes et sur les deux séries climatiques

Comme expliqué précédemment dans le chapitre 7, la part de la production laitière « autonome » dans la production totale présente un écart entre les deux systèmes de production, du fait de la distribution d'aliments concentrés indexée sur le stade de lactation et la production laitière potentielle. Ainsi, la part de la production laitière autonome est plus importante en hiver pour le système « GP » que le système

« GA » et le phénomène s'inverse au pâturage. La Figure 6 montre qu'en hiver plus le chargement augmente, plus la part du lait « autonome » diminue.

Outre les apports d'aliments concentrés identiques d'un chargement à l'autre, cette diminution est due à l'augmentation des achats de fourrages complémentaires. **Seul le taux de lait autonome sur la période d'alimentation hivernale est affecté.** En effet, en période d'alimentation au pâturage, les systèmes n'ont jamais recours à des achats de fourrages complémentaires. En cas de manque de disponibilité d'herbe à pâturer, ayant lieu le plus souvent fin juillet – début août, le système distribue des stocks fourragers provenant de l'exploitation, puisque les fauches en première coupe ont déjà été réalisées. La part du lait autonome au pâturage tend à augmenter légèrement sous l'effet de la hausse du chargement (effet pourtant non significatif). Cette tendance est due à l'accroissement de la production laitière moyenne annuelle sous l'effet de la hausse du chargement. Le fait que le taux de lait autonome au pâturage ne soit pas affecté par l'augmentation du chargement montre que des marges d'utilisation de l'herbe au pâturage sont possibles.

Par ailleurs, le graphe a de la Figure 6 montre que la part du lait autonome sur le lait total produit n'est pas identique entre les deux séries climatiques. La part du lait autonome semble plus faible pour la série climatique 2007-2011 (effet « série climatique » non significatif). Ce résultat est cohérent avec le niveau d'achats de fourrages plus important pour cette série climatique que la première (Tableau 10 et Tableau 11).

En outre, le graphe a indique que la production laitière autonome du système « GP » devient plus faible que celle du système « GA » pour le niveau de chargement le plus élevé sur la période 1995-1999 et les deux chargements les plus élevés sur la période 2007-2011. La part de l'énergie apportée par les fourrages complémentaires est d'autant plus importante que le stade de lactation des vaches du système « GP » est avancé et qu'elles produisent moins de lait que les vaches du système « GA » à la même période.

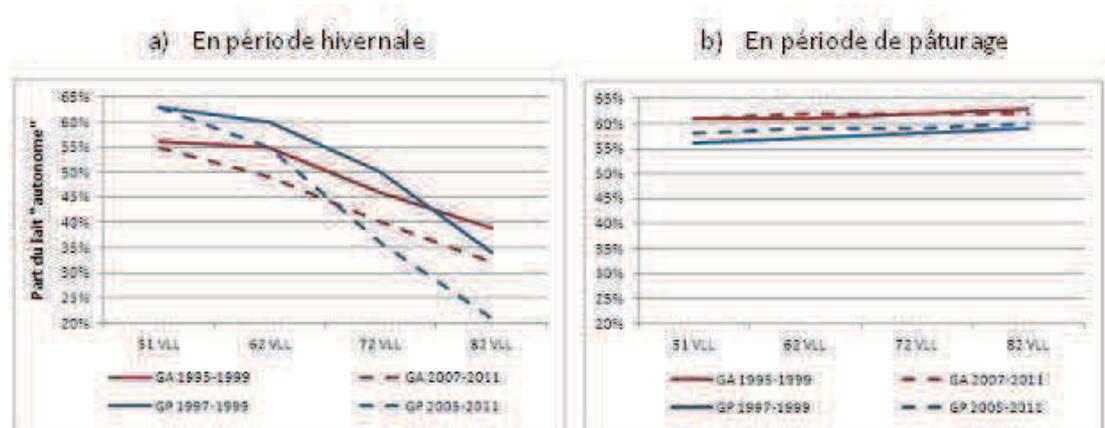


Figure 6 : Impact du chargement sur la part du lait "autonome" sur la production laitière totale, en période d'alimentation hivernale (graph a) et en période d'alimentation au pâturage (graph b)

Tableau 9 : Bilan fourrage des deux systèmes sur les deux séries climatiques simulées selon les chargements (en T.UGB⁻¹)

	0.94 (51VL)		1.14 (62VL)		1.34 (72VL)		1.54 (82VL)	
	GA	GP	GA	GP	GA	GP	GA	GP
Moyenne	0.71	0.41	0.32	0.12	0.02	-0.1	-0.18	-0.28
2007-2011	0.48	0.30	0.13	0.03	-0.11	-0.23	-0.33	-0.37
1995-1999	0.30	0.29	0.07	0.06	0.07	0.09	0.08	0.13
2007-2011	0.57	0.43	0.25	0.31	0.25	0.22	0.22	0.31
1995-1999	0.19 - 0.98	-0.09 - 0.62	0.26 - 0.45	0.04 - 0.19	-0.07 - 0.1	-0.18 - 0.00	-0.26 - -0.06	-0.39 - -0.12
2007-2011	-0.18 - 1.02	-0.27 - 0.72	-0.12 - 0.47	-0.45 - 0.32	-0.38 - 0.24	-0.56 - -0.06	-0.56 - -0.06	-0.74 - -0.05

Tableau 10 : Fourrages achetés et fourrages vendus du système "GA" des deux séries climatiques selon les chargements (en t.an⁻¹)

	0.94 (51VL)	1.14 (62VL)	1.34 (72VL)	1.54 (82VL)
Moyenne	0	0	20.1	43.9
2007-2011	0	8.3	30.9	41.5
Ecart-type	0	21.8	13.6	12.5
2007-2011	0	17.7	16.0	20.5
1995-1999	0	30.3 – 83.0	0 – 33.2	22.9 – 54.8
2007-2011	0	15.72 – 55.7	14.2 – 57.6	37.4 – 91.2
Fourrages achetés	0	0	20.1	43.9
Fourrages vendus	53.2	28.3	19.1	16.5
Fourrages achetés	0	8.3	30.9	41.5
Fourrages vendus	36.3	18.6	14.7	12.1
Ecart-type	0	21.8	13.6	12.5
2007-2011	0	17.7	16.0	20.5
1995-1999	0	30.3 – 83.0	0 – 33.2	22.9 – 54.8
2007-2011	0	15.72 – 55.7	14.2 – 57.6	37.4 – 91.2
Fourrages achetés	0	0	20.1	43.9
Fourrages vendus	53.2	28.3	19.1	16.5
Fourrages achetés	0	8.3	30.9	41.5
Fourrages vendus	36.3	18.6	14.7	12.1
Ecart-type	0	21.8	13.6	12.5
2007-2011	0	17.7	16.0	20.5
1995-1999	0	30.3 – 83.0	0 – 33.2	22.9 – 54.8
2007-2011	0	15.72 – 55.7	14.2 – 57.6	37.4 – 91.2
Min - Max	0	15.72 – 55.7	14.2 – 57.6	37.4 – 91.2
Fourrages achetés	0	0	20.1	43.9
Fourrages vendus	53.2	28.3	19.1	16.5
Fourrages achetés	0	8.3	30.9	41.5
Fourrages vendus	36.3	18.6	14.7	12.1
Ecart-type	0	21.8	13.6	12.5
2007-2011	0	17.7	16.0	20.5
1995-1999	0	30.3 – 83.0	0 – 33.2	22.9 – 54.8
2007-2011	0	15.72 – 55.7	14.2 – 57.6	37.4 – 91.2
Min - Max	0	15.72 – 55.7	14.2 – 57.6	37.4 – 91.2

Tableau 11 : Fourrages achetés et fourrages vendus du système "GP" des deux séries climatiques selon les chargements (en t.an⁻¹)

	0.94 (51VL)	1.14 (62VL)	1.34 (72VL)	1.54 (82VL)
Moyenne	0	3.0	15.05	38.5
2007-2011	0	7.1	30.12	57.0
Ecart-type	0	3.4	13.5	24.9
2007-2011	0	14.9	24.8	28.2
1995-1999	0	8.1 – 58.5	0 – 36.1	7.8 – 58.9
2007-2011	0	2.8 – 44.0	10.6 – 69.8	16.4 – 92.9
Fourrages achetés	0	3.0	15.05	38.5
Fourrages vendus	29.0	12.2	2.25	0
Fourrages achetés	0	7.1	30.12	57.0
Fourrages vendus	22.3	10.1	0	0
Ecart-type	0	3.4	13.5	24.9
2007-2011	0	14.9	24.8	28.2
1995-1999	0	8.1 – 58.5	0 – 36.1	7.8 – 58.9
2007-2011	0	2.8 – 44.0	10.6 – 69.8	16.4 – 92.9
Fourrages achetés	0	3.0	15.05	38.5
Fourrages vendus	29.0	12.2	2.25	0
Fourrages achetés	0	7.1	30.12	57.0
Fourrages vendus	22.3	10.1	0	0
Ecart-type	0	3.4	13.5	24.9
2007-2011	0	14.9	24.8	28.2
1995-1999	0	8.1 – 58.5	0 – 36.1	7.8 – 58.9
2007-2011	0	2.8 – 44.0	10.6 – 69.8	16.4 – 92.9
Min - Max	0	2.8 – 44.0	10.6 – 69.8	16.4 – 92.9
Fourrages achetés	0	3.0	15.05	38.5
Fourrages vendus	29.0	12.2	2.25	0
Fourrages achetés	0	7.1	30.12	57.0
Fourrages vendus	22.3	10.1	0	0
Ecart-type	0	3.4	13.5	24.9
2007-2011	0	14.9	24.8	28.2
1995-1999	0	8.1 – 58.5	0 – 36.1	7.8 – 58.9
2007-2011	0	2.8 – 44.0	10.6 – 69.8	16.4 – 92.9
Min - Max	0	2.8 – 44.0	10.6 – 69.8	16.4 – 92.9

Tableau 12 : Part du lait "autonome" dans la production laitière réalisée du système "GA" selon les périodes de production, hiver et pâturage, selon les chargements et sur les deux séries climatiques

	0.94 (51VL)		1.14 (62VL)		1.34 (72VL)		1.54 (82VL)	
	Hiver	Pâturage	Hiver	Pâturage	Hiver	Pâturage	Hiver	Pâturage
Moyenne	0.56	0.61	0.55	0.61	0.46	0.62	0.39	0.63
2007-2011	0.55	0.61	0.49	0.62	0.40	0.62	0.32	0.62
Ecart-type	0	0.01	0.01	0.02	0.07	0.02	0.05	0.02
2007-2011	0.01	0.02	0.09	0.02	0.09	0.02	0.10	0.02
1995-1999	0.55 – 0.56	0.60 – 0.62	0.54 – 0.56	0.59 – 0.64	0.41 – 0.56	0.60 – 0.64	0.35 – 0.47	0.59 – 0.64
2007-2011	0.54 – 0.56	0.59 – 0.63	0.33 – 0.55	0.59 – 0.63	0.26 – 0.49	0.59 – 0.63	0.16 – 0.41	0.60 – 0.64

Tableau 13 : Part du lait "autonome" dans la production laitière réalisée du système "GP" selon les périodes de production, hiver et pâturage, selon les chargements et sur les deux séries climatiques

	0.94 (51VL)		1.14 (62VL)		1.34 (72VL)		1.54 (82VL)	
	Hiver	Pâturage	Hiver	Pâturage	Hiver	Pâturage	Hiver	Pâturage
Moyenne	0.63	0.56	0.60	0.57	0.50	0.58	0.34	0.59
2007-2011	0.63	0.58	0.55	0.59	0.36	0.59	0.21	0.60
1995-1999	0.00	0.01	0.03	0.01	0.12	0.02	0.20	0.01
2007-2011	0.01	0.02	0.06	0.02	0.23	0.02	0.20	0.01
1995-1999	0.62 – 0.63	0.55 – 0.58	0.55 – 0.63	0.56 – 0.58	0.32 – 0.63	0.56 – 0.60	0.14 – 0.58	0.57 – 0.60
2007-2011	0.62 – 0.64	0.55 – 0.60	0.44 – 0.59	0.56 – 0.61	0 – 0.55	0.56 – 0.61	0 – 0.52	0.59 – 0.61

8.3 Incidence du niveau des apports de concentrés

8.3.1 Production laitière

Comme l'indique la Figure 7 et les résultats présentés dans le Tableau 14 et le Tableau 15, la diminution des apports d'aliments concentrés affecte très fortement et très significativement la production laitière moyenne annuelle des deux systèmes simulés et ce, sur les deux niveaux de chargement. Entre le système de base avec $1200 \text{ kg.VLL}^{-1}.\text{an}^{-1}$ et le système sans concentré, la diminution de la quantité de lait produite est estimée respectivement à 1355 et 1218 kg de lait pour le système GA avec des chargements de 0.94 et $1.34 \text{ UGB}.\text{ha}^{-1}$ et, 1155 et 1006 kg de lait pour le système GP. Ainsi, la diminution des apports de concentrés affecte plus le système GA que le système GP puisque la perte de production laitière est plus importante. Ceci est expliqué par la moyenne des taux de substitution, différents entre la saison d'alimentation hivernale et au pâturage, le taux de substitution au pâturage étant plus important. De plus, la valeur UFL moyenne de la ration de base hivernale est inférieure à la valeur UFL moyenne de l'herbe ingérée favorisant ainsi le système « GP » effectuant plus de lait lors du pâturage que le système « GA ». Nous pouvons noter que le rapport entre les aliments concentrés économisés et la perte de lait associée est en cohérence avec les valeurs d'efficacité des aliments concentrés rencontrées dans la littérature (Hoden *et al.*, 1991, Delaby et Pomiès, 2004, McEvoy *et al.*, 2008, Delaby *et al.*, 2009).

Par ailleurs, la perte de production laitière due à la diminution des apports d'aliments concentrés est moins importante sur des systèmes plus chargés avec une différence de près de $140 \text{ kg.VLL}^{-1}.\text{an}^{-1}$, malgré un effet «chargement» non significatif. Cette différence pourrait être due à une amélioration de l'utilisation de l'herbe au pâturage pour le chargement le plus élevé avec une ingestion de l'herbe pâturée légèrement favorisée mais surtout une valeur UFL moyenne de l'herbe ingérée fortement améliorée, augmentant de ce fait la production laitière permise par la ration.

Comme le montre la Figure 7, **nous pouvons noter que les réponses en lait ne sont pas linéaires par rapport à la diminution des apports d'aliments concentrés.** La perte de production laitière est moins importante entre les apports de 1200 et 800 kg de concentrés qu'entre 800 et 400 kg ou encore entre 400 kg et 0 kg de concentrés. Le kg de concentré économisé entre 1200 et 800 kg diminue la production laitière d'environ 0.90 kg pour le système GA au chargement $0.94 \text{ UGB}.\text{ha}^{-1}$ et d'environ 0.75 kg pour le chargement $1.34 \text{ UGB}.\text{ha}^{-1}$. Entre les niveaux 800 et 400 kg de concentrés apportés, l'impact d'un kg de concentré en moins est évalué à 1.17 et 1.07 kg de lait pour les deux niveaux de chargement respectifs. A faible niveau de chargement, cette différence d'efficacité de l'économie de concentré est présente pour le système GP avec une

diminution de 0.83 kg de lait par kg de concentré entre 1200 et 800 kg de concentrés et 1.05 kg entre 800 et 400 kg de concentré. Cependant, à un fort niveau de chargement, cette différence est amoindrie avec une diminution de 0.72 kg de lait entre 1200 et 800 kg et 0.83 kg de lait entre 800 et 400 kg. Ainsi, maintenir une pression de pâturage importante pour le système de production laitière basé sur la valorisation de l'herbe permet de restreindre les apports de concentrés tout en limitant la perte de lait associée.

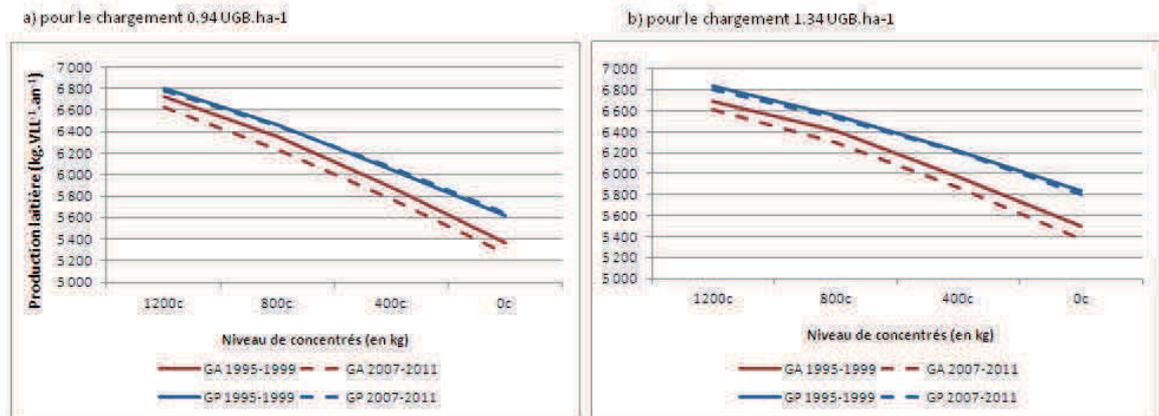


Figure 7 : Effet du niveau d'apports d'aliments concentrés dans la ration sur la production laitière moyenne annuelle des deux systèmes étudiés sur les deux séries climatiques et les deux niveaux de chargement (en kg.VLL⁻¹.an⁻¹)

Sur la Figure 8 et la Figure 9, l'impact des niveaux d'apports d'aliments concentrés sur la production laitière quotidienne est très identifiable, notamment pour le système GA lors de l'alimentation en hiver avec une différence d'environ 6 kg de lait entre les deux traitements les plus opposés. L'effet « concentrés » lors de l'alimentation hivernale est moins important pour le système « GP » avec un écart d'environ 2 kg de lait entre le niveau de concentré le plus important et la suppression totale du concentré. Cette différence de réponse est due à la différence entre les apports énergétiques de la ration fourragère et les besoins énergétiques des animaux déterminés par le stade de lactation des vaches laitières associé à la distribution des vêlages, spécifique des systèmes étudiés, à une même date calendaire. Cependant, l'effet « concentré » est extrêmement présent pour le système GP au début de lactation. Moins la ration comporte d'aliments concentrés et plus la mobilisation des réserves corporelles des vaches en lactation s'arrête tôt. La chute de lait est alors d'autant plus importante que la ration est pauvre en concentrés.

La diminution des apports d'aliments concentrés lors de la saison de pâturage affecte moins la production laitière qu'en saison d'alimentation hivernale. Lors de la saison de printemps, la variation de production laitière du système GA selon les apports de concentrés est relativement minime, quel que soit le niveau de chargement. La production laitière réalisée reste proche de la production laitière potentielle. Ce phénomène explique que le niveau de production laitière annuelle par vache diminue moins pour le système « GP » que « GA » puisque sa production laitière est principalement faite au cours de la saison de pâturage.

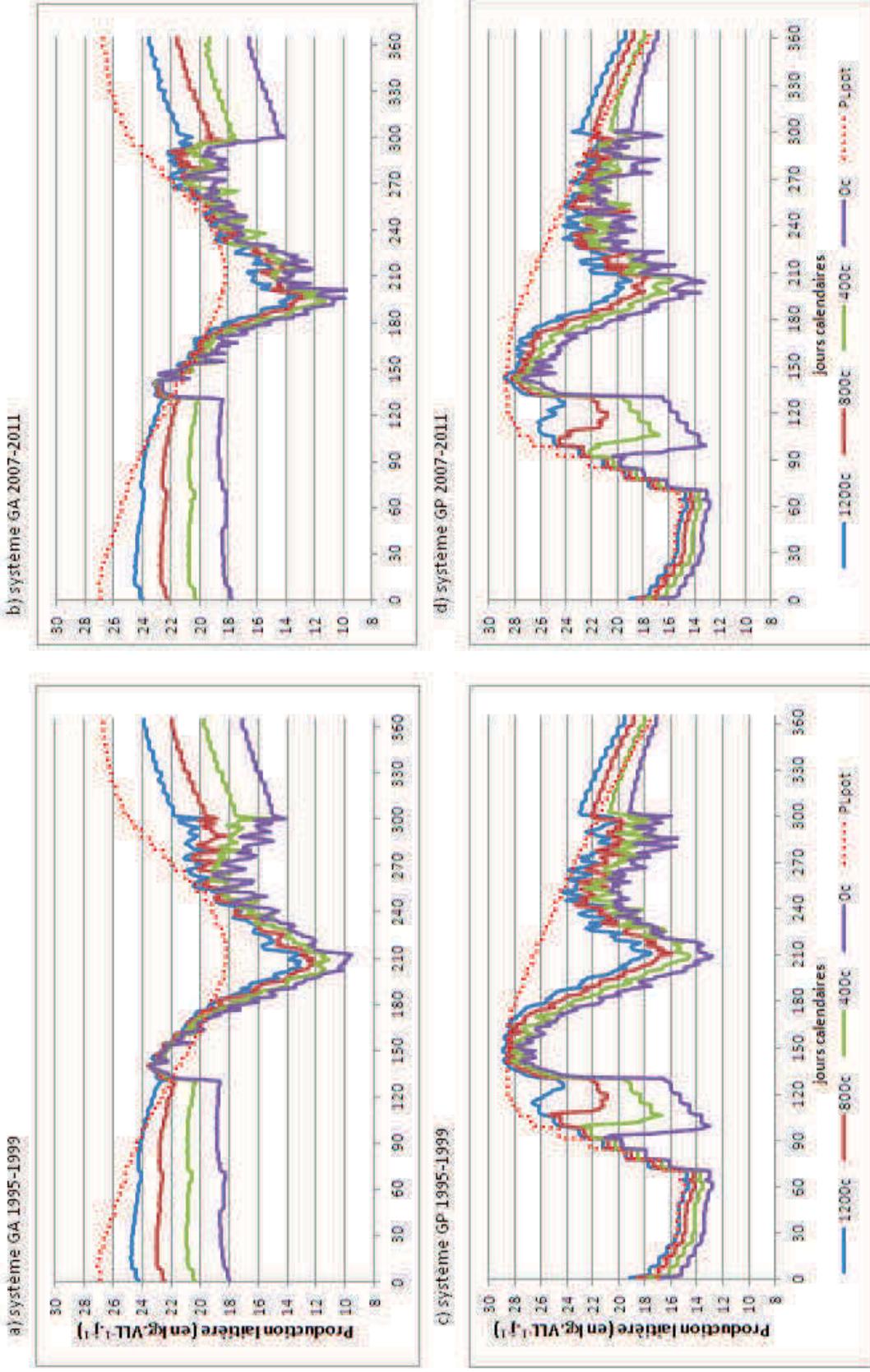


Figure 8 : Impact du niveau d'apport des aliments concentrés sur les productions laitières quotidiennes des deux systèmes sur les deux séries climatiques étudiées pour un chargement de 0.94 UGB.ha⁻¹ soit 51 vaches laitières (en kg.VLL⁻¹.j⁻¹)

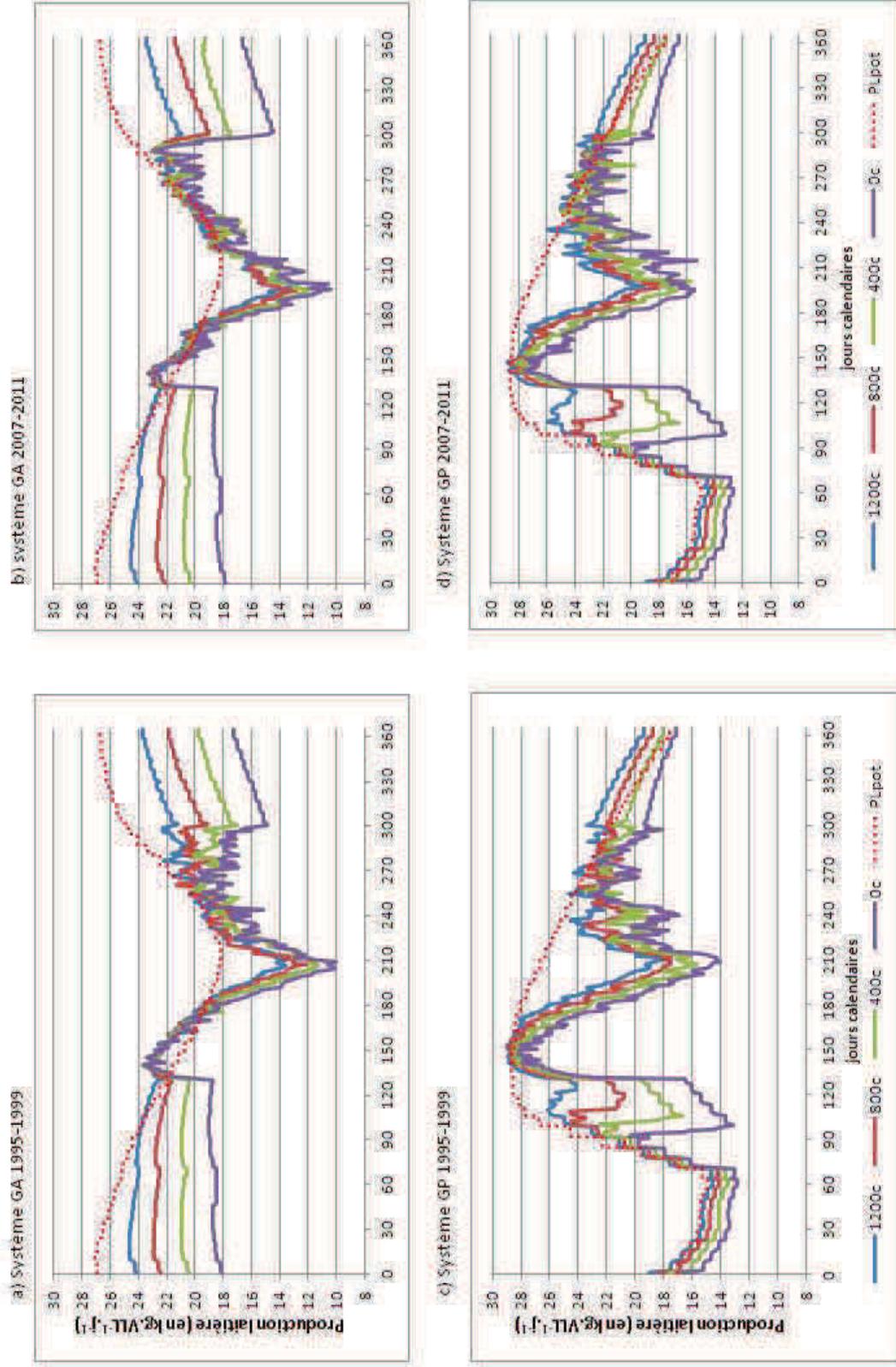


Figure 9 : Impact du niveau d'apport des aliments concentrés sur les productions laitières quotidiennes des deux systèmes sur les deux séries climatiques étudiées pour un chargement de 1.34 UGB.ha⁻¹ soit 72 vaches laitières (en kg.VLL⁻¹.j⁻¹)

Tableau 14 : Impact des niveaux d'apports d'aliments concentrés sur la production laitière moyenne annuelle du système « GA », pour les chargements 0.94 et 1.34 UGB.ha⁻¹, pour les deux séries climatiques (en kg.VL⁻¹.an⁻¹)

	1200 kg		800 kg		400 kg		0 kg	
	0.94 (51VL)	1.34 (72VL)						
Moyenne	6724	6695	6351	6413	5882	5971	5364	5501
2007-2011	6623	6616	6230	6293	5768	5869	5273	5374
Ecart-type	27	80	32	114	61	163	104	115
2007-2011	88	126	94	139	114	143	145	195
1995-1999	6689 – 6765	6613 – 6774	6322 – 6406	6252 – 6526	5830 – 5955	5711 – 6133	5259 – 5491	5374 – 5616
2007-2011	6516 – 6719	6456 – 6784	6123 – 6348	6090 – 6471	5626 – 5907	5657 – 6029	5095 – 5475	5105 – 5619

Tableau 15 : Impacts des niveaux d'apports d'aliments concentrés sur la production laitière moyenne annuelle du système « GP », pour les chargements 0.94 et 1.34 UGB.ha⁻¹, pour les deux séries climatiques (en kg.VL⁻¹.an⁻¹)

	1200 kg		800 kg		400 kg		0 kg	
	0.94 (51VL)	1.34 (72VL)						
Moyenne	6798	6841	6465	6551	6044	6221	5623	5836
2007-2011	6776	6807	6447	6530	6068	6204	5604	5798
Ecart-type	43	66	74	96	79	135	102	169
2007-2011	61	86	87	79	90	74	97	108
1995-1999	6747 – 6840	6768 – 6922	6391 – 6560	6445 – 6657	5959 – 6140	6048 – 6382	5510 – 5715	5597 – 6027
2007-2011	6391 – 6560	6672 – 6907	6301 – 6503	6395 – 6602	5944 – 6167	6093 – 6292	5470 – 5705	5668 – 5945

8.3.2 Utilisation de l'herbe pâturée

La diminution des apports d'aliments concentrés améliore la valorisation de l'herbe au pâturage comme l'indique la Figure 10. Ainsi, cette diminution entraîne un accroissement significatif des quantités moyennes d'herbe ingérée au cours de la saison de pâturage. Cette quantité est proche de 17 kg MS.VLL⁻¹.j⁻¹ pour les vaches en pleine lactation du système « GP » à fort chargement et sans apports de concentrés. Ce chiffre est cohérent avec les niveaux moyens d'ingestion de biomasse d'une vache laitière moyennement productive (7000 litres de lait par lactation). Cet accroissement des quantités d'herbe ingérée est moins important pour les vaches du système « GA » que celles du système « GP », compte-tenu de leur stade de lactation plus avancé (une différence estimée à +0.4 et +0.5 kg MS entre GP et GA respectivement sur les deux chargements). Par ailleurs, l'effet « concentrés » sur l'ingestion est amplifié par un niveau de chargement plus élevé (+0.30 kg MS entre 1.34 et 0.94 UGB.ha⁻¹ pour le système GP).

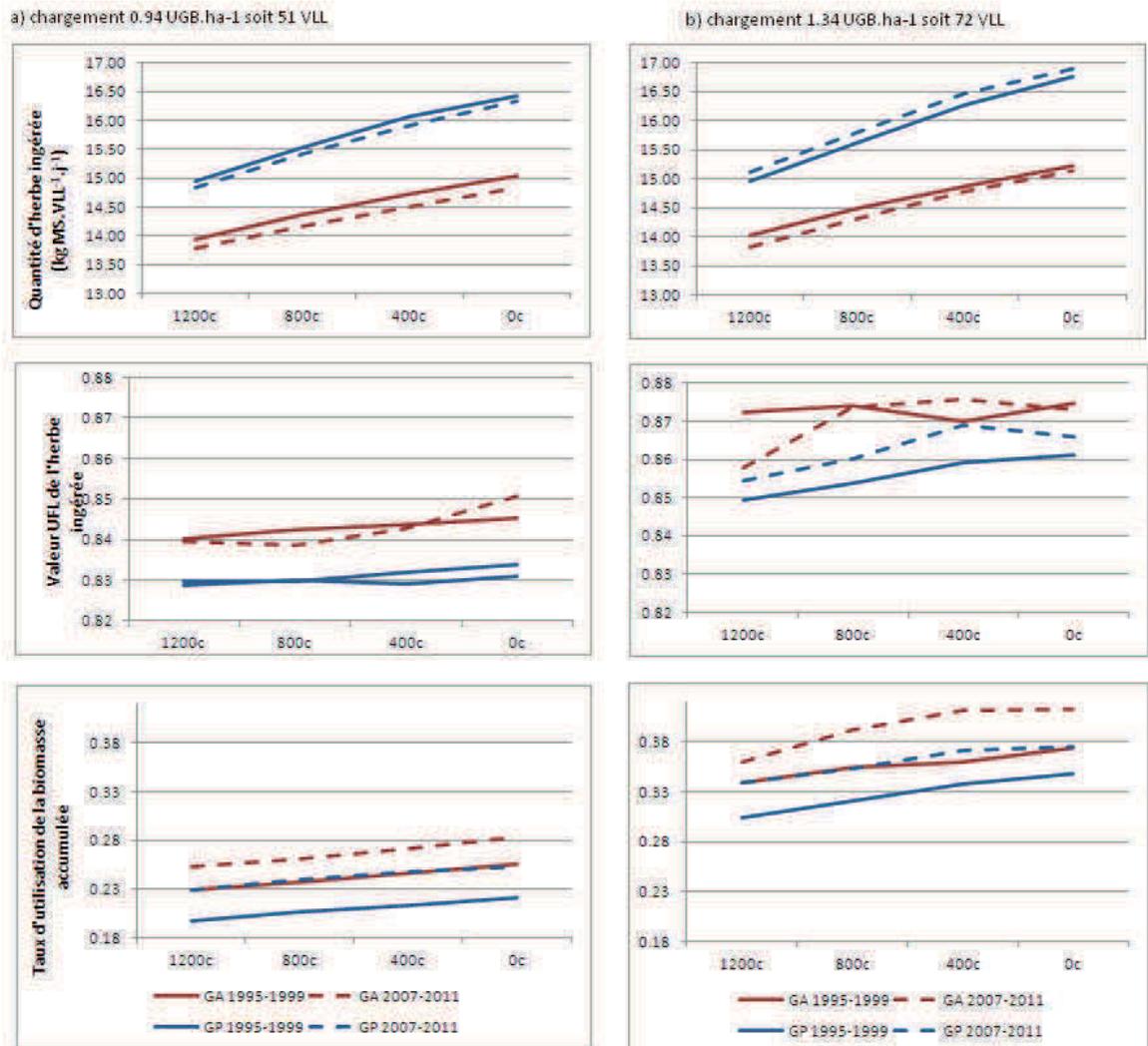


Figure 10 : Impact des niveaux d'apports d'aliments concentrés sur les variables d'utilisation de l'herbe : quantité moyenne d'herbe ingérée au cours de la saison de pâturage, valeur UFL moyenne de cette herbe ingérée et taux d'utilisation de la biomasse accumulée par les vaches au pâturage

La valeur moyenne de l'herbe ingérée au pâturage ne semble pas affectée par la diminution des apports de concentrés au pâturage puisque les variations entre les traitements sont estimées en moyenne à 0.01 UFL (Figure 10).

La diminution des apports d'aliments concentrés semble avoir un effet favorable sur les taux d'utilisation de la biomasse produite sur une parcelle pâturée par les vaches en lactation (Figure 10, Tableau 18 et Tableau 19). Cependant, l'effet « concentrés » n'est pas significatif, ce qui pourrait être dû à une trop grande variation des valeurs des taux d'utilisation d'une année sur l'autre (la valeur de l'écart-type représentant en moyenne 15% de la valeur moyenne).

Tableau 16 : Impact du niveau d'apports d'aliments concentrés sur les quantités d'herbe ingérée au cours de la saison de pâturage pour le système "GA", pour les chargements 0.94 et 1.34 UGB.ha⁻¹, pour les deux séries climatiques (en kg MS.VLL⁻¹.j⁻¹)

	1200 kg		800 kg		400 kg		0 kg	
	0.94 (51VL)	1.34 (72VL)						
Moyenne	13.95	14.02	14.37	14.49	14.72	14.87	15.03	15.22
2007-2011	13.79	13.83	14.17	14.31	14.51	14.77	14.84	15.13
Ecart-type	0.15	0.19	0.15	0.18	0.18	0.20	0.18	0.17
2007-2011	0.21	0.19	0.24	0.22	0.29	0.17	0.30	0.30
1995-1999	13.69 - 14.05	13.73 - 14.24	14.12 - 14.49	14.21 - 14.71	14.44 - 14.92	14.60 - 15.11	14.75 - 15.22	15.01 - 15.42
2007-2011	13.48 - 14.07	13.59 - 14.05	13.79 - 14.41	14.01 - 14.58	14.03 - 14.78	14.55 - 14.99	14.39 - 15.21	14.85 - 15.58

Tableau 17 : Impact du niveau d'apports d'aliments concentrés sur les quantités d'herbe ingérée au cours de la saison de pâturage pour le système "GP", pour les chargements 0.94 et 1.34 UGB.ha⁻¹, pour les deux séries climatiques (en kg MS.VLL⁻¹.j⁻¹)

	1200 kg		800 kg		400 kg		0 kg	
	0.94 (51VL)	1.34 (72VL)						
Moyenne	14.81	14.97	15.42	15.64	15.91	16.27	16.34	16.77
2007-2011	14.96	15.12	15.54	15.81	16.06	16.48	16.42	16.89
Ecart-type	0.08	0.06	0.13	0.07	0.12	0.15	0.18	0.20
2007-2011	0.13	0.23	0.15	0.24	0.22	0.27	0.20	0.19
1995-1999	14.75 - 14.94	14.92 - 15.07	15.31 - 15.64	15.58 - 15.75	15.76 - 16.08	16.07 - 16.45	16.11 - 16.50	16.47 - 16.98
2007-2011	14.84 - 15.16	14.83 - 15.44	15.39 - 15.73	15.49 - 16.07	15.78 - 16.30	16.06 - 16.75	16.14 - 16.68	16.56 - 17.01

Tableau 18 : Impact du niveau d'apports d'aliments concentrés sur les taux d'utilisation de la biomasse produite par les vaches en lactation au cours de la saison de pâturage pour le système "GA", pour les chargements 0.94 et 1.34 UGB.ha⁻¹, pour les deux séries climatiques (en kg MS.VLL⁻¹.j⁻¹)

	1200 kg		800 kg		400 kg		0 kg	
	0.94 (51VL)	1.34 (72VL)						
Moyenne	0.23	0.34	0.24	0.35	0.25	0.36	0.26	0.37
2007-2011	0.25	0.36	0.26	0.39	0.27	0.41	0.28	0.41
Ecart-type	0.04	0.05	0.04	0.05	0.04	0.05	0.04	0.07
2007-2011	0.03	0.04	0.03	0.05	0.03	0.05	0.03	0.04
1995-1999	0.18 – 0.27	0.28 – 0.39	0.18 – 0.28	0.28 – 0.40	0.19 – 0.28	0.30 – 0.41	0.19 – 0.30	0.29 – 0.43
2007-2011	0.20 – 0.28	0.30 – 0.39	0.21 – 0.29	0.32 – 0.46	0.22 – 0.29	0.35 – 0.49	0.23 – 0.31	0.37 – 0.46

Tableau 19 : Impact du niveau d'apports d'aliments concentrés sur les taux d'utilisation de la biomasse produite par les vaches en lactation au cours de la saison de pâturage pour le système "GP", pour les chargements 0.94 et 1.34 UGB.ha⁻¹, pour les deux séries climatiques (en kg MS.VLL⁻¹.j⁻¹)

	1200 kg		800 kg		400 kg		0 kg	
	0.94 (51VL)	1.34 (72VL)						
Moyenne	0.20	0.30	0.21	0.32	0.21	0.34	0.22	0.35
2007-2011	0.23	0.34	0.24	0.35	0.25	0.37	0.25	0.37
Ecart-type	0.03	0.04	0.03	0.05	0.03	0.05	0.03	0.05
2007-2011	0.03	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
1995-1999	0.15 – 0.22	0.24 – 0.35	0.16 – 0.23	0.25 – 0.37	0.17 – 0.24	0.26 – 0.39	0.17 – 0.26	0.27 – 0.40
2007-2011	0.18 – 0.27	0.27 – 0.40	0.19 – 0.28	0.29 – 0.39	0.19 – 0.29	0.30 – 0.41	0.20 – 0.29	0.31 – 0.40

8.3.3 Autonomie

Le niveau des apports d'aliments concentrés dans la ration semble avoir un effet sur le bilan fourrager des deux systèmes, sur les deux niveaux de chargement étudiés (Figure 11, Tableau 20 et Tableau 21). Pour les deux niveaux de chargement, les bilans fourragers diminuent sensiblement au fur et à mesure de la diminution des apports d'aliments concentrés. Ce phénomène est dû à une plus grande consommation de fourrages conservés en période d'alimentation hivernale en relation avec la diminution des aliments concentrés. Ce phénomène est cohérent avec l'augmentation des niveaux d'ingestion de l'herbe consommée au pâturage. Ainsi, par exemple, pour le système GA à un chargement de 0.94 UGB.ha⁻¹, la moyenne d'ingestion de fourrages conservés en période hivernale est de 17.47 kg MS.VLL⁻¹.j⁻¹ pour une ration sans aliments concentrés alors qu'il est de 15.8 kg MS.VLL⁻¹.j⁻¹ pour un apport annuel de 1200 kg de concentrés. Cet écart est de 17.15 contre 15.40 kg MS.VLL⁻¹.j⁻¹ pour le système GP dans les mêmes conditions. L'effet du niveau des apports de concentrés dans la ration n'est toutefois pas significatif sur le bilan fourrager compte-tenu des écarts-types très importants marquant une variation du bilan fourrager importante d'une année sur l'autre. De plus, l'effet « concentré » n'agit pas sur les niveaux d'ingestion des autres lots. Or, comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, le reste du troupeau laitier est non négligeable dans la valorisation des fourrages conservés, comme de l'herbe pâturée.

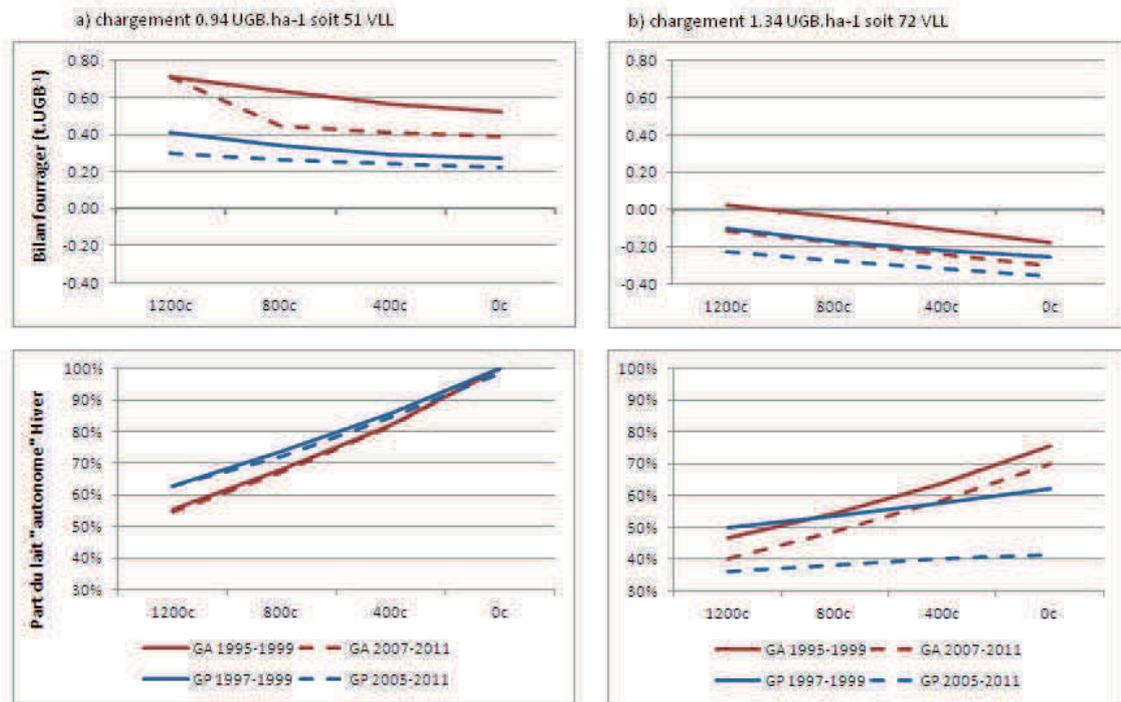


Figure 11 : Impact du niveau des apports d'aliments concentrés sur le bilan fourrager et sur la part du lait autonome sur la production laitière totale en période hivernale, pour les deux systèmes, sur les deux séries climatiques simulées et pour les deux niveaux chargement 0.94 et 1.34 UGB.ha⁻¹

Comme l'indique la Figure 11, quel que soit le niveau d'apport d'aliments concentrés dans la ration, à un faible chargement, le bilan fourrager reste excédentaire pour les deux systèmes et les deux séries climatiques. Ainsi, la gestion du système fourrager et de ses performances permet d'assurer une autonomie alimentaire totale, à l'exception de l'année 2010 pour le système « GP » qui achète 4.75, 5 et 5.05 tonnes de fourrages complémentaires pour palier le manque de fourrages récoltés lors de l'année 2009. De ce fait, la part de la production laitière « autonome » dans la production laitière totale augmente proportionnellement à la diminution des apports d'aliments concentrés, en hiver comme au pâturage (Figure 11 et Tableau 22).

A l'inverse, pour le niveau de chargement plus élevé, le bilan fourrager avec un apport de 1200kg de concentrés était déjà déficitaire à l'exception du système « GA » pour la série climatique la plus clémente. Ainsi au fur et à mesure de la diminution des apports d'aliments concentrés, les ventes de fourrages diminuent, les achats de fourrages augmentent proportionnellement et le bilan fourrager devient de plus en plus déficitaire, atteignant ainsi -0.17 et -0.30 t.UGB⁻¹ pour le système « GA » et -0.26 et -0.36 t.UGB⁻¹ pour le système « GP ».

Avec le chargement de 1.34 UGB.ha⁻¹, l'augmentation de la part de lait « autonome » dans la production laitière totale est freinée par les achats de fourrages complémentaires. Pour le système « GA » sans apports de concentrés, le lait autonome ne représente que 76 % pour la période 1995-1999 et 70% pour la période 2007-2011. Le lait « autonome » du système « GP » sans apports de concentrés atteint 62% en moyenne sur 1995-1999 et seulement 42 % sur 2007-2011. A travers ces données, nous retrouvons le fait que la série climatique 2007-2011 est moins favorable à la constitution des stocks, affectant d'autant plus le bilan fourrager. Cette différence est particulièrement visible sur les résultats du système « GP ». Ainsi, à fort niveau de chargement, le système fourrager tel qu'il est paramétré et géré ne permet pas d'assurer une autonomie alimentaire et fourragère à l'échelle de l'exploitation.

Tableau 20 : Impact du niveau d'apports d'aliments concentrés sur les bilans fourragers pour le système "GA", pour les chargements 0.94 et 1.34 UGB.ha⁻¹, pour les deux séries climatiques (en t.UGB⁻¹)

	1200 kg		800 kg		400 kg		0 kg	
	0.94 (51VL)	1.34 (72VL)	0.94 (51VL)	1.34 (72VL)	0.94 (51VL)	1.34 (72VL)	0.94 (51VL)	1.34 (72VL)
Moyenne	0.71	0.02	0.63	-0.04	0.56	-0.11	0.52	-0.17
2007-2011	0.71	-0.11	0.44	-0.18	0.41	-0.24	0.39	-0.30
Ecart-type	0.30	0.07	0.29	0.06	0.31	0.03	0.28	0.05
2007-2011	0.30	0.25	0.51	0.24	0.47	0.24	0.39	0.24
1995-1999	0.19 – 0.98	-0.07 – -0.10	0.13 – 0.90	-0.10 – -0.10	0.03 – 0.84	-0.16 – -0.08	0.05 – 0.80	-0.24 – -0.13
2007-2011	0.19 – 0.98	-0.38 – -0.24	-0.15 – -0.94	-0.46 – -0.155	-0.20 – -0.87	-0.52 – -0.078	-0.24 – -0.82	-0.55 – -0.03

Tableau 21 : Impact du niveau d'apports d'aliments concentrés sur les bilans fourragers pour le système "GP", pour les chargements 0.94 et 1.34 UGB.ha⁻¹, pour les deux séries climatiques (en t.UGB⁻¹)

	1200 kg		800 kg		400 kg		0 kg	
	0.94 (51VL)	1.34 (72VL)						
Moyenne	0.41	-0.10	0.34	-0.17	0.29	-0.22	0.27	-0.26
2007-2011	0.30	-0.23	0.26	-0.28	0.24	-0.32	0.22	-0.36
Ecart-type	0.29	0.09	0.31	0.10	0.29	0.07	0.24	0.06
2007-2011	0.43	0.22	0.38	0.25	0.36	0.28	0.35	0.29
1995-1999	-0.09 – -0.62	-0.18 - 0	-0.20 – -0.56	-0.20 – -0.01	-0.22 – -0.51	-0.28 – -0.11	-0.14 – -0.46	-0.33 – -0.15
2007-2011	-0.27 – -0.72	-0.56 – -0.06	-0.29 – -0.66	-0.62 – -0.08	-0.33 – -0.60	-0.66 – -0.03	-0.37 – -0.55	-0.70 – -0.02

Tableau 22 : Impact du niveau d'apports d'aliments concentrés sur la part de lait « autonome » dans la production totale par saison, hiver ou pâturage, pour le système "GA", pour les chargements 0.94 et 1.34 UGB.ha⁻¹, pour les deux séries climatiques (%)

	1200 kg		800 kg		400 kg		0 kg							
	0.94 (51VL)		1.34 (72VL)		0.94 (51VL)		1.34 (72VL)							
	Hiver	Patur.	Hiver	Patur.	Hiver	Patur.	Hiver	Patur.						
Moyenne	56	61	46	62	68	72	54	74	82	86	64	86	100	100
1995-1999	0	1	7	2	0	1	7	1	0	0	5	1	0	2
2007-2011	1	2	9	2	1	1	9	1	1	1	10	1	0	15
Ecart-type	55-56	60-62	41-56	60-64	68	71-74	50-66	73-75	82	85-86	60-71	85-87	100	73-79
Min - Max	54-56	59-63	26-49	59-63	67-68	71-74	33-57	72-76	81-82	85-87	41-68	85-87	100	44-82

Tableau 23 : Impact du niveau d'apports d'aliments concentrés sur la part de lait « autonome » dans la production totale par saison, hiver ou pâturage, pour le système "GP", pour les chargements 0.94 et 1.34 UGB.ha⁻¹, pour les deux séries climatiques (%)

	1200 kg		800 kg		400 kg		0 kg							
	0.94 (51VL)		1.34 (72VL)		0.94 (51VL)		1.34 (72VL)							
	Hiver	Patur.	Hiver	Patur.	Hiver	Patur.	Hiver	Patur.						
Moyenne	63	56	50	58	74	69	54	71	86	83	58	85	100	100
1995-1999	0	1	12	2	0	1	18	1	0	1	23	1	0	26
2007-2011	1	2	23	2	3	2	25	2	3	1	28	1	4	28
Ecart-type	62-63	55-58	32-63	56-60	73-74	68-70	33-74	69-72	85-86	83-84	35-86	84-86	100	38-100
Min - Max	62-64	55-60	0-55	56-61	67-74	68-72	0-65	69-74	78-86	83-85	0-77	84-86	92-100	0-75

8.3.4 Vaut-il mieux produire du lait ou tendre vers un système totalement autonome ?

Pour le niveau de chargement $0.94 \text{ UGB} \cdot \text{ha}^{-1}$, le système étant toujours autonome en fourrages, le degré d'autonomie alimentaire à l'échelle de l'exploitation ne dépend que des apports d'aliments concentrés qui sont autorisés en entrée du système. Nous avons donc cherché à évaluer grossièrement le coût de cette autonomie en ne prenant en compte que le prix des concentrés économisés mais aussi le prix du lait non produit, ainsi que la période de production laitière, reliée à la grille de paiement du lait. Pour cela, nous nous sommes basés sur les référentiels édités par l'Institut de l'Élevage dans le cas-type BL15 indiquant la grille de paiement du lait et le prix moyen des aliments concentrés basiques de l'année 2010.

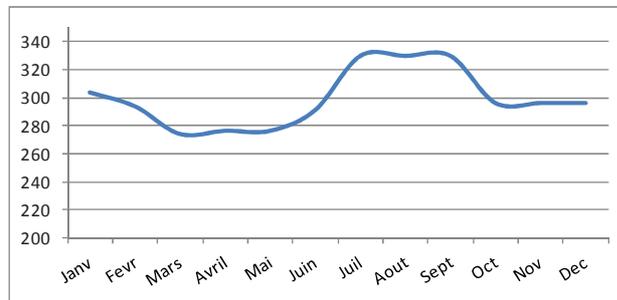


Figure 12 : Grille de paiement du lait de l'année 2010 (€·1000l⁻¹) source : Réseaux d'élevage

Au regard des résultats du Tableau 24, la recherche d'un plus grand degré d'autonomie alimentaire ne semblerait pas intéressant économiquement pour le système « GA », quel que soit le niveau d'économie d'aliments concentrés réalisé. Le différentiel entre le coût de concentrés et le coût de la perte de lait associé est trois fois plus important pour le niveau 1200 kg vs 0 kg que pour le niveau 1200 vs 800kg. En revanche, le système « GP » est favorable économiquement à une diminution des apports d'aliments concentrés jusqu'à $400 \text{ kg} \cdot \text{VLL}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$. Cette différence de coûts entre les deux systèmes est à relier à l'étalement de la production laitière au cours de la campagne, spécifique aux deux systèmes et de la grille de paiement du lait qui ne rémunère pas le lait de la même façon d'un mois à l'autre. De plus, l'offre herbagère permet de limiter la diminution de production laitière au pâturage. Or, le système « GP » produit plus de lait à cette période et est mieux rémunéré.

Tableau 24 : Evaluation des coûts liés à l'économie de consommation des aliments concentrés et à la perte de lait associée en fonction de la grille de paiement du lait de 2010 et d'un prix du concentrés de $258.60 \text{ €} \cdot \text{t}^{-1}$

	GA			GP		
	1200-800	1200-400	1200-0	1200-800	1200-400	1200-0
Perte de lait	-5 666	-11 992	-19 569	-4 743	-10 335	-16 623
Economie de concentrés	+5 206	+10 413	+15 619	+5 371	+10 743	+16 114
Différentiel	-460	-1 579	-3 950	+628	+408	-509

8.4 En conclusion

Nous avons vu dans le chapitre précédent que les deux systèmes étudiés étaient globalement sous-utilisateurs de l'herbe offerte et, par conséquent, qu'ils disposaient d'importantes marges de manœuvres pour améliorer la valorisation de la ressource herbagère. A l'issue de l'analyse des résultats des simulations effectuées selon le plan expérimental mis en place, nous pouvons conclure que **l'offre herbagère et le système de gestion du pâturage permettent de supporter, d'une part, une intensification importante de la production laitière à travers une augmentation conséquente du chargement en maintenant des performances animales très élevées et, d'autre part, une limitation de la perte de lait associée à la diminution des apports d'aliments concentrés dans la ration.**

L'augmentation du chargement permet d'améliorer la production laitière à l'hectare mais aussi à l'échelle de l'animal. Cependant cette augmentation s'effectue au détriment du degré d'autonomie fourragère et alimentaire à l'échelle de l'exploitation pour pouvoir assurer une alimentation suffisante en période hivernale.

L'augmentation du chargement sur une même surface pâturable ne dégrade pas les niveaux d'ingestion d'herbe au pâturage et favorise même cette ingestion pour le système « GP ». La valeur UFL moyenne de l'herbe ingérée et les taux d'utilisation de la biomasse produite valorisée par les vaches en lactation sont améliorés par l'augmentation de la pression de pâturage. De même, la valorisation de l'herbe pâturable est favorisée par la diminution des apports d'aliments concentrés même si seule la quantité d'herbe ingérée est améliorée significativement. Les niveaux de production laitière quotidienne permise par l'offre herbagère lors de la saison de pâturage ne varient que très peu avec l'augmentation de la pression de pâturage. L'impact de la diminution des apports d'aliments concentrés sur la production laitière par vache est limité lors de la saison de pâturage.

Ainsi, le système herbager et l'offre herbagère associée permettent aux deux systèmes, soit d'atteindre des niveaux de performances laitières maximisés à travers l'intensification de la production laitière à l'hectare, soit de tendre vers un degré d'autonomie alimentaire plus important en limitant les apports d'aliments concentrés. **Or, les niveaux d'utilisation de la biomasse produite par les parcelles pâturées par les vaches en lactation et l'absence de recours à la distribution de fourrages conservés au pâturage montrent que l'offre herbagère supporte bien des systèmes très contraints ou intensifs tout en gardant quelques marges de sécurité dans la disponibilité de l'herbe à pâturer.**

Pour conserver ces niveaux de valorisation de l'herbe pâturée et de performances animales ou de recherche d'un plus grand degré d'autonomie alimentaire, il faudrait cependant pouvoir sécuriser le système fourrager et la constitution des stocks, en quantité comme en qualité, en ajustant la part des surfaces fauchées sur celles pâturées.

CHAPITRE IX

9 DISCUSSION GENERALE

9.1 Les apports de Dynamilk à la construction des compromis entre production et utilisation des prairies

L'objectif de cette thèse était d'analyser les compromis qu'il est possible d'atteindre entre productions animales, utilisations des ressources alimentaires, fourragères et herbagères et recherche d'un plus grand degré d'autonomie fourragère et alimentaire à l'échelle de l'exploitation. Pour répondre à cette question, nous avons construit et validé le modèle de simulation « Dynamilk » à l'échelle de l'exploitation permettant de représenter le fonctionnement d'une exploitation laitière herbagère située en zone contraignante. Ce simulateur nous a permis d'explorer deux systèmes de production contrastés, dont l'un repose sur des vêlages groupés en automne – hiver, et l'autre sur des vêlages de fin d'hiver – printemps. Le premier système réalise l'essentiel de sa production laitière avec des fourrages conservés et le second au pâturage, en cohérence avec notre hypothèse de recherche qu'une meilleure adéquation entre dynamique de production laitière et dynamique d'offre herbagère ou fourragère permettrait d'améliorer les compromis et leurs maintiens face à des changements. Dans un deuxième temps, nous avons étudié les capacités de ces deux systèmes à maintenir ces compromis, d'une part, dans une recherche d'une meilleure valorisation de l'herbe par l'augmentation de chargement global et, d'autre part, dans une recherche d'augmentation de l'autonomie par la diminution des apports d'aliments concentrés. Cette étude a été réalisée en prenant en compte le changement climatique et la fréquence des aléas par la comparaison de deux séries climatiques contrastées.

9.1.1 Autonomie fourragère et conduite des stocks fourragers

La comparaison des deux systèmes, tous deux avec un chargement faible ($0.94 \text{ UGB} \cdot \text{ha}^{-1}$) et un apport d'aliments concentrés de $1200 \text{ kg} \cdot \text{VLL}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ a montré sur une série climatique longue que les deux systèmes arrivaient à atteindre une autonomie fourragère totale pour le système « GA » et quasi totale pour le système « GP ». Les bilans fourragers de ces deux systèmes sont, en général, largement excédentaires et permettent de surmonter les années difficiles et parfois même, successives. Ce résultat est cohérent avec les travaux de Coleno *et al.* (2002) et de Nettier *et al.* (2010a). Ce dernier montre que l'une des stratégies adoptées par les éleveurs des Alpes du nord est justement de sur-dimensionner la surface récoltable afin de constituer des stocks conséquents permettant le report de stocks d'une année sur l'autre. Une question soulevée par ce résultat est la pérennité de cette stratégie en cas de répétition d'années climatiques non favorables à la constitution des stocks comme le laisse présager l'évolution des données climatiques des années 2003 à 2011. La question se pose d'autant plus pour les systèmes adhérents à un cahier des charges prohibant les

fourrages fermentés puisque le rendement et la digestibilité du foin de première coupe, séché au sol semble s'éroder (cf. chapitre 6).

Nous avons effectué des bilans alimentaires, sur la consommation réelle des vaches en lactation et de l'ensemble du troupeau, afin de discerner les niveaux d'ingestion des deux systèmes (fourrages conservés et herbe pâturée). Ces bilans ont été effectués sur les deux chargements 0.94 et 1.34 UGB.ha⁻¹ et sur deux années, l'une considérée comme étant une « bonne année » et l'autre comme une « année difficile » (Figure 1 et Figure 2).

Conformément aux hypothèses de construction des scénarios d'étude, les vaches en lactation du système « GA » ingèrent plus de fourrages conservés que le système « GP » et, à l'opposé, les vaches en lactation du système « GP » ingèrent plus d'herbe que celles du système « GA ». Cependant, quand nous calculons le total ingéré moyen par vache au cours de sa lactation (fourrages et herbe pâturée), les deux systèmes sont équivalents, quel que soit le niveau de chargement étudié, à savoir **4.77 t MS.VLL⁻¹.an⁻¹**, valeur à laquelle nous pouvons ajouter 1.2 t MS.VLL⁻¹.an⁻¹ d'aliments concentrés.

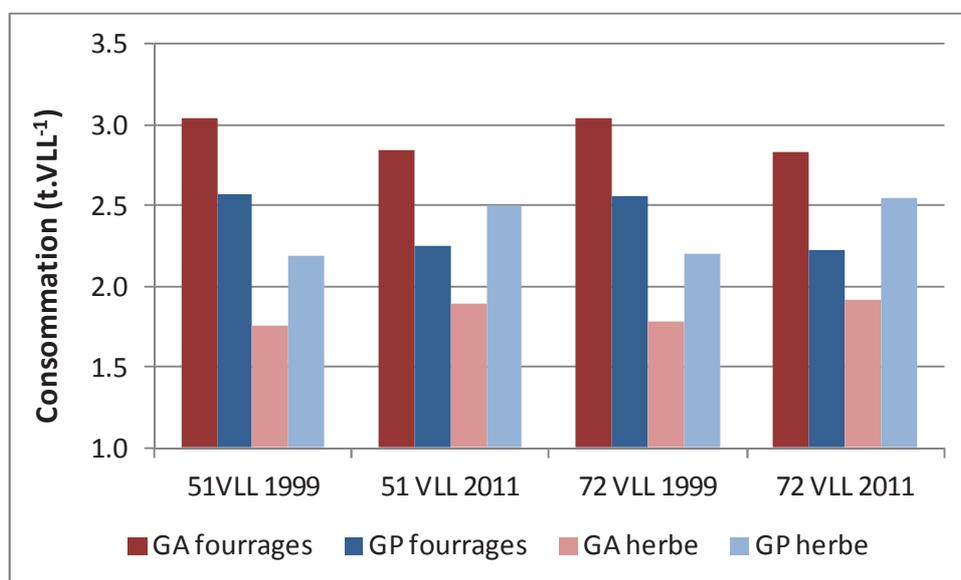


Figure 1 : Consommation totale par les vaches en lactation de fourrages conservés et d'herbe pâturée selon les deux systèmes étudiés sur l'année 1999 et 2011 ainsi que sur les chargements 0.94 et 1.34 UGB.ha⁻¹ (en t MS.VLL⁻¹)

La Figure 2 met bien en évidence que les niveaux d'ingestion à l'échelle du troupeau sont identiques entre les deux systèmes, que ce soit en période hivernale ou au pâturage. Ainsi, les différences de niveaux d'ingestion entre fourrages conservés et pâturés des vaches en lactation sont compensées par les niveaux d'ingestion des autres lots du troupeau. L'ingestion totale de fourrages conservés et d'herbe pâturée est évaluée à **4.54 t MS.UGB⁻¹**.

Par conséquent, nous ne pouvons pas conclure que l'autonomie fourragère est favorisée par l'un des deux systèmes à l'échelle du troupeau. Toutefois, le niveau d'ingestion des vaches en lactation étant moins important en période hivernale, le système « GP » a de moindres besoins en fourrages récoltés de bonne qualité et à

quantité moyenne totale égale par UGB, il consomme plus de fourrages stockés de moins bonne qualité que le système « GA ».

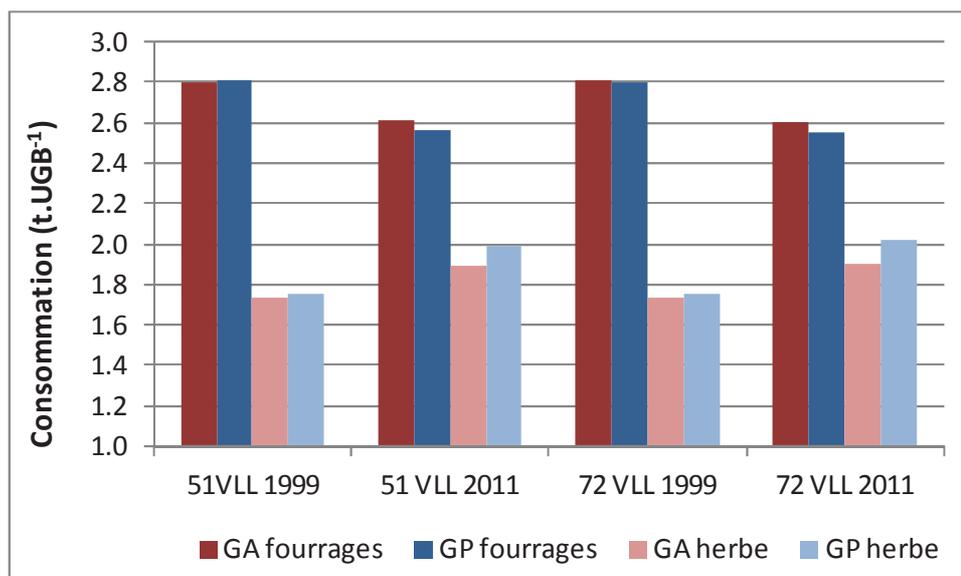


Figure 2 : Consommation totale par les animaux du troupeau de fourrages conservés et d'herbe pâturée selon les deux systèmes étudiés sur l'année 1999 et 2011 ainsi que sur les chargements 0.94 et 1.34 UGB.ha⁻¹ (en t MS.UGB⁻¹)

Les niveaux d'ingestion totale des vaches au cours de leur lactation est de **5.97 t MS.VLL⁻¹ en moyenne** ce qui est cohérent avec les ordres de grandeur admis (NB. Pour avoir une vision claire de l'ingestion totale d'une vache laitière, il faut ajouter à 5.97 l'ingestion moyenne des vaches tarées au cours de leur tarissement, soit 0.59 t.VLT⁻¹ environ). Par exemple, dans l'étude menée par Delaby et Peyraud (2009) recensant les niveaux d'ingestion de différents systèmes, ces valeurs sont respectivement de 5.25 t MS.VLL⁻¹ pour des systèmes irlandais avec des niveaux de production entre 5600 et 7400 kg de lait par vaches, 6.17 t MS.VLL⁻¹ pour des holstein à 6760 kg.VLL⁻¹ (Trévarez) et 6.51 t MS.VLL⁻¹ pour des holstein produisant 6835 kg.VLL⁻¹ et des normandes à 5640 kg.VLL⁻¹ (Haras-au-Pin)

9.1.2 Valorisation de l'herbe pâturée

Les résultats décrits dans le chapitre 6 ont montré que les deux systèmes étudiés sous-utilisaient l'offre herbagère au cours de la saison de pâturage, mis en exergue par les taux faibles d'utilisation de la biomasse produite sur les parcelles pâturées par les vaches en lactation.

L'augmentation de la pression de pâturage a démontré que la biomasse offerte par les couverts herbacés permettait de « tendre » les systèmes de production et d'améliorer la valorisation de l'herbe (en quantité et en qualité) sans pour autant affecter les performances animales. Les travaux sur l'effet de l'augmentation du chargement au pâturage (de 2.6 à 2.9 VL.ha⁻¹) sur les performances dans les systèmes herbagers océaniques ont pourtant montré une dégradation de ces performances à l'échelle de l'animal (Dillon *et al.*, 1995). L'absence de cet effet sur les performances animales (même une légère amélioration) indique qu'il existe encore des marges de

manœuvre pour optimiser la valorisation de l'herbe au pâturage. Par ailleurs, pour les prairies productives de milieu fertile que nous avons utilisées dans les simulations, les taux d'utilisation de la biomasse produite qui sont atteints à de forts chargement sont proches des taux d'utilisation optimum définis par le taux de prélèvement par les animaux (ou la fauche) permettant d'exprimer au mieux la diversité floristique (Jouven, 2006 ; Jouven *et al.*, 2007).

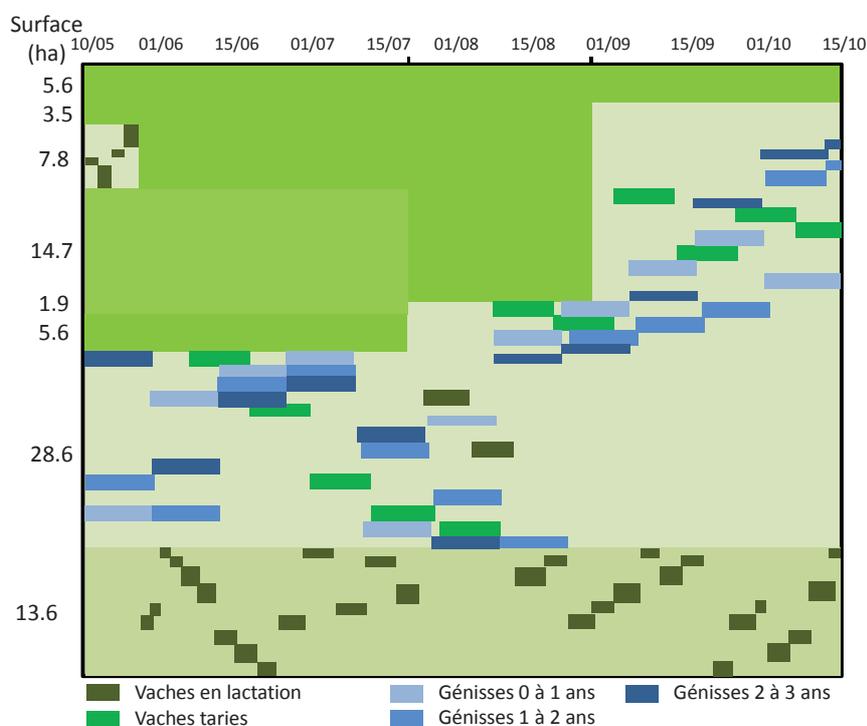


Figure 3 : Calendrier de pâturage du système GA, chargement 1.34 UGB.ha⁻¹ et 1200 kg.VL⁻¹.an⁻¹ de concentrés de l'année 2007

L'augmentation de la pression de pâturage, qu'elle soit due au chargement ou à la diminution des apports d'aliments concentrés, permet une utilisation de l'espace plus importante comme le montre la Figure 3 avec le calendrier de pâturage de l'année 2007 du système GA pour un chargement de 1.34 UGB.ha⁻¹. Les temps de séjour sur les parcelles occupées par les vaches en lactation sont plus courts, permettant une rotation plus rapide et d'atteindre jusqu'à quatre passages sur une même parcelle au cours de la saison. L'effet de l'augmentation de la pression de pâturage se distingue également dans la comparaison effectuée dans le Tableau 1. Les temps de séjour sur une parcelle sont plus courts entre les deux niveaux de chargement principalement lors du pâturage printanier (début de l'enchaînement de parcelles pâturées décrit ci-dessous : mi-mai).

Selon l'enchaînement décrit dans le Tableau 1, la biomasse consommée sur les parcelles n'est pas significativement différente entre les deux niveaux de chargement (ANOVA, p-value=0.605) alors que la biomasse consommée par jour est très significativement différente (ANOVA, p-value=0.000).

Nous avons calculé les taux d'utilisation de la biomasse offerte et accessible sur chaque parcelle pâturée par les vaches en lactation au cours d'un enchaînement de

parcelles pour les deux niveaux de chargement. Ce calcul de taux est différent du taux d'utilisation de la biomasse produite sur les parcelles pâturées par les vaches en lactation prenant en compte toute la biomasse produite chaque jour sur ces parcelles et donc, la biomasse accessible et non accessible par les animaux. Notre dernier calcul nous indique que les vaches en lactation valorisent jusqu'à 77% de la biomasse qui leur est accessible sur une parcelle ($\mu_{51VLL}=0.62$ et $\mu_{72VLL}=0.68$).

Tableau 1 : Temps de séjour et biomasse consommée au cours de l'utilisation successive par le pâturage de 7 parcelles au printemps pour le GA avec un chargement de 0.94 (51 VL) et 1.34 UGB.ha⁻¹ (72 VL).

	surface offerte (are.VLL ⁻¹)		temps de séjour (j)		Biomasse consommée kg MS.ha ⁻¹		Biomasse cons. par jour kg.ha ⁻¹ .j ⁻¹		Taux d'utilisation biomasse offerte	
	51 VL	72 VL	51 VL	72 VL	51 VL	72 VL	51 VL	72 VL	51 VL	72 VL
p1	2.55	1.81	6	3	3001	2390	500	797	0.58	0.51
p2	3.53	2.08	10	6	4020	4013	402	669	0.65	0.68
p3	3.53	2.08	10	5	3924	3566	392	713	0.59	0.60
p4	2.60	2.50	9	9	4914	5060	546	562	0.70	0.77
p5	3.06	2.55	10	9	4546	4991	455	555	0.65	0.72
p6	3.20	2.17	10	8	4254	5186	425	648	0.62	0.73
p7	3.57	1.92	10	7	3895	5053	389	722	0.58	0.72

9.1.3 Intérêt de coupler la dynamique des besoins avec la dynamique de l'offre herbagère

Selon les résultats de la comparaison des deux systèmes étudiés et de leur capacité à faire face à des changements, que ce soit des aléas climatiques ou des changements de contraintes (augmentation du chargement et/ou diminution des apports d'aliments concentrés), nous pouvons conclure sur l'intérêt effectif de coupler la dynamique des besoins alimentaires du troupeau avec la dynamique de l'offre fourragère.

Bien que les niveaux moyens d'ingestion des deux systèmes soient identiques à l'échelle du troupeau et de la vache laitière, le système « GA » consomme plus de fourrages de bonne qualité issus des fauches de première coupe que le système « GP ». De plus, nous avons vu que la production laitière du système « GA » était plus sensible à la qualité des fourrages conservés que le système « GP » induisant une plus grande variation de la quantité de lait produit d'une année sur l'autre. Or, la qualité et la quantité des foins récoltés en première coupe sont sensibles aux variations des conditions climatiques lors de la période printanière et estivale. La digestibilité de ces fourrages semble accuser une baisse tendancielle depuis l'année 2003, encore plus marquée de 2009 à 2011.

Nous avons pu mettre en évidence que la production laitière permise par l'offre herbagère au pâturage n'était pas affectée, quelle que soit la pression de pâturage

appliquée, et qu'elle était peu altérée par la diminution des apports d'aliments concentrés (l'impact le plus important étant pour le système « GP » lorsque les vaches se situent en période de mobilisation des réserves corporelles en début de lactation). Ainsi, nous avons pu démontrer que l'offre herbagère permettait de subvenir aux besoins, même intenses, des animaux des deux systèmes et d'accéder à des performances animales importantes. Ainsi, les ressources herbagères offrent d'importantes marges de manœuvre pour mieux valoriser l'herbe pâturée, aliment restant le moins coûteux.

Caler la dynamique des besoins alimentaires sur l'offre herbagère, comme le système « GP », semble donc une voie pertinente pour accéder à de meilleures performances animales, limiter la variation de la production d'une année sur l'autre et utiliser les potentialités des ressources herbagères. Cette voie semble également permettre aux systèmes de production d'être moins sensibles aux variations des conditions climatiques affectant la qualité des fourrages récoltés, mais pas la qualité de l'herbe ingérée, dans la mesure où le pâturage et le déplacement des lots de parcelles en parcelles sont bien gérés. Par conséquent, nous pouvons nous demander pourquoi ces systèmes sont si peu présents dans les zones montagnardes, bien que préconisés par exemple en cas de conversion en agriculture biologique (Ragot, 2001) ou étudiés dans le cadre d'expérimentations systèmes (Fiorelli *et al.*, 2010 ; Steinwidder *et al.*, 2010). En effet, pour les systèmes les plus présents sur le terrain, le système « GA » tout comme le cas-type BL 15, nous avons mis en évidence qu'ils étaient sous-dimensionnés et sous-chargés par rapport aux potentialités des ressources fourragères et herbagères offertes. Cet état de fait et cette sous-valorisation pourraient notamment s'expliquer par une aversion au risque des éleveurs face aux aléas climatiques et un manque potentiel de ressources, comportement mis en évidence par exemple par Nettier *et al.* (2010a). Ce sous dimensionnement est également la conséquence d'une augmentation des surfaces (agrandissement des structures) plus rapide que l'augmentation des quotas laitiers (Streifeneder *et al.*, 2007). Il est notamment compensé par la présence très fréquente d'un cheptel allaitant permettant d'occuper l'espace excédentaire et de valoriser une partie des ressources herbagères (Chatellier et Delattre, 2005), l'apport alimentaire de ce cheptel pouvant par ailleurs être restreint en cas d'année difficile.

9.1.4 Vers des systèmes plus performants ?

Nous avons vu que le système « GP » reposant sur une meilleure adéquation entre la dynamique des besoins alimentaires des vaches en lactation et de la dynamique de l'offre herbagère permettait d'atteindre et de maintenir des performances animales et d'utilisation des ressources intéressantes. Cependant, en cas de trop fort chargement, et/ou de diminution trop intense des apports d'aliments concentrés, le bilan fourrager, et donc l'autonomie fourragère, étaient dégradés.

En effet, de façon à pouvoir comparer les deux systèmes ensemble, toutes choses égales par ailleurs, nous avons choisi de limiter le nombre de paramètres distincts entre les deux systèmes. Et surtout, lors des simulations étudiant l'effet du chargement, nous n'avons pas modifié la surface récoltable, ce qui n'est pas cohérent avec la réalité. Le besoin fourrager par vache laitière est estimé à un peu plus de 2.5 t MS. Il conviendrait donc de dimensionner l'usage des parcelles de façon à récolter cette quantité et rétablir l'équilibre du bilan fourrager.

Nous avons ainsi simulé les deux systèmes, pour un chargement de 1.34 UGB.ha⁻¹, en modifiant le rapport entre les surfaces consacrées à la fauche et à la pâture au printemps, tout en conservant la même SAU. En effet, nous avons vu précédemment que l'offre herbagère nous permettait d'importantes marges de manœuvre. Nous avons donc décidé de réduire de 10% la surface consacrée au pâturage au profit des fauches de premières coupes.

Le Tableau 2 présentant les principales sorties synthétiques nous indique que les performances laitières sont améliorées avec en moyenne sur les deux séries climatiques +50 kg.VLL⁻¹.an⁻¹ pour le système « GA » et +150 kg.VLL⁻¹.an⁻¹ pour le système « GP » comparativement aux simulations effectuées sur le parcellaire normal avec un chargement de 1.34 UGB.ha⁻¹. Cette amélioration des performances laitières ne se fait pas au détriment des autres composantes du système de production puisque les bilans fourragers sont largement excédentaires pour le système « GA » et sont à l'équilibre pour le système « GP ». Cette amélioration des performances laitières est permise par une utilisation de l'offre herbagère qui devient proche de l'optimum, comme l'indiquent les taux d'utilisation, les quantités d'herbe ingérée et la qualité de cette dernière. La Figure 4 souligne bien qu'au cours de la saison de pâturage, les productions laitières quotidiennes des deux systèmes dont le parcellaire a été modifié, sont supérieures à celles dont le parcellaire n'a pas été modifié.

L'ajustement du dimensionnement du système fourrager en attribuant plus de surfaces de fauche pour une même SAU permet d'aboutir à des systèmes très performants aussi bien en termes de productions laitières, d'utilisation des ressources herbagères et d'autonomie fourragère. Les vaches laitières du système « GP » parviennent même à atteindre des niveaux de production proches de leur potentiel laitier.

Tableau 2 : Sorties synthétiques des simulations associées à la modification de la surface consacrée aux fauches et au pâturage au printemps pour les deux systèmes et les deux séries climatiques (*les valeurs moyennes notées en vert sont un rappel des valeurs des simulations avec un parcellaire non modifié)

	Production laitière totale	Production laitière par UGB	Production laitière par ha	Production laitière par ha	Taux d'utilisation fauches	Taux d'utilisation pâtures	Production laitière autonome régime hiver	Production laitière autonome pâturage	Bilan fourrager	Qih moyen VL	UFLh moyen VLL
GA 1995-1999	6 680	4 374	5 916	0.42	0.49	0.51	0.63	0.25	13.93	0.89	
moyenne											
écart-type	123	80	109	0.06	0.04	0.06	0.02	0.29	0.27	0.01	
<i>moyenne*</i>	6753	-	-	-	0.34	0.46	0.62	0.02	14.02	0.86	
GA 2007-2011	6 793	4 448	6 016	0.46	0.47	0.55	0.63	0.41	14.15	0.89	
moyenne											
écart-type	89	59	79	0.03	0.05	0.01	0.02	0.15	0.08	0.01	
<i>moyenne*</i>	6616	-	-	-	0.36	0.40	0.62	-0.11	13.83	0.86	
GP 1995-1999	6 997	4 582	6 196	0.46	0.40	0.62	0.60	0.06	15.35	0.89	
moyenne											
écart-type	46	30	41	0.04	0.03	0.01	0.00	0.08	0.07	0.01	
<i>moyenne*</i>	6841	-	-	-	0.30	0.50	0.58	-0.1	14.97	0.85	
GP 2007-2011	6 957	4 556	6 161	0.43	0.43	0.57	0.61	-0.02	15.41	0.89	
moyenne											
écart-type	74	49	66	0.06	0.02	0.07	0.01	0.28	0.09	0.01	
<i>moyenne*</i>	6807	-	-	-	0.34	0.36	0.59	-0.23	15.12	0.85	

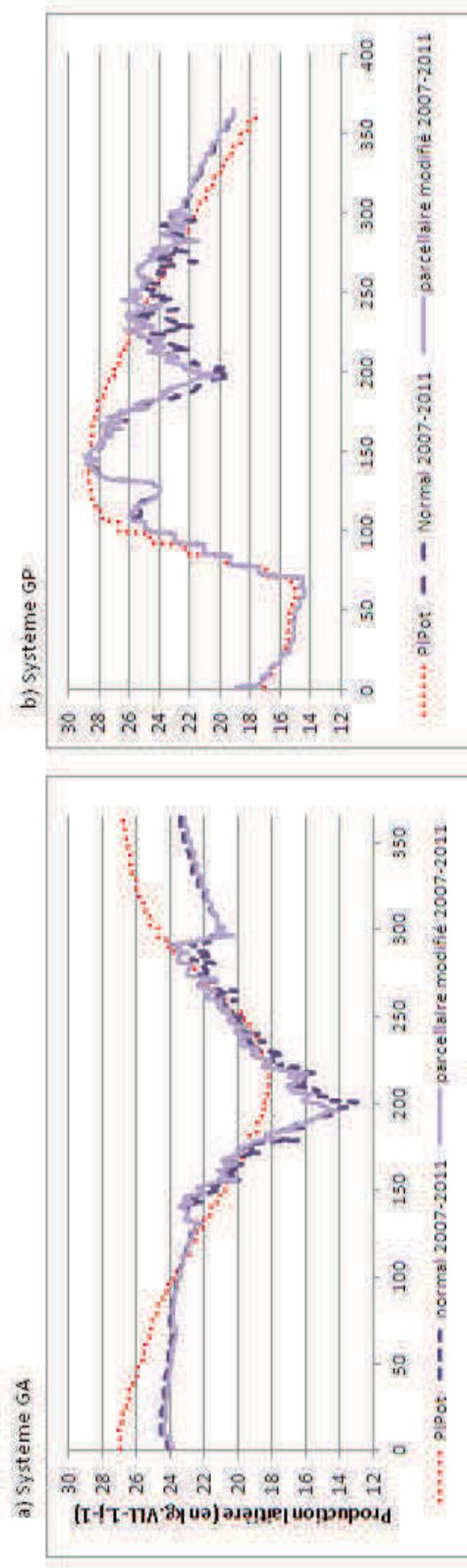


Figure 4 : Productions lactières quotidiennes des deux systèmes GA et GP entre le parcelaire normal et le parcelaire consacrant plus de surface à la constitution des stocks (en kg.VLL⁻¹.j⁻¹)

9.2 Domaine de validité et contraintes d'utilisation de Dynamilk

9.2.1 Processus de validation de Dynamilk

Une fois implémenté, le simulateur Dynamilk a fait l'objet d'une validation de façon à vérifier son comportement par rapport aux objectifs de modélisation et d'évaluer la précision et la vraisemblance de ses résultats. Cette validation s'est effectuée par partie.

Lors de son développement, le module de croissance de l'herbe avait été validé par Jouven *et al.* (2006a). Sa précision avec le RMSD a été évaluée à 0.7 t de MS/ha pour la production et à 0.04 g/g pour la digestibilité. N'ayant pas apporté de modification à ce sous-modèle, nous n'en n'avons pas réalisé de nouvelle validation.

La validation du sous-modèle troupeau a été effectuée sur les éléments attenants au lot des vaches en lactation en analysant le comportement du modèle face à des changements de paramètres et en comparant les résultats prédits par le modèle avec des données expérimentales. L'analyse du comportement du modèle a porté sur quelques paramètres sélectionnés : la conduite du troupeau avec des distributions de vêlages variées et le niveau de chargement instantané au pâturage ; les caractéristiques zootechniques à travers le potentiel laitier des vaches laitières ; les caractéristiques de l'offre alimentaire (digestibilité de la ration de base et des apports d'aliments concentrés). Les résultats du modèle dynamique d'ingestion et de production laitière ont ensuite été comparés à des données réelles issues d'expérimentations en période d'alimentation et de production en hiver d'une part, et au pâturage d'autre part. Le modèle reproduit de façon satisfaisante la courbe de lactation en hiver comme au pâturage avec une précision de la production laitière quotidienne simulée évaluée à **1.8 et 2.1 kg.VLL⁻¹.j⁻¹** en hiver (comparaison avec deux lots expérimentaux) et à **1.4 kg.VLL⁻¹.j⁻¹** au pâturage.

Nous avons ensuite validé le modèle global en le comparant à deux jeux de données différents, l'un provenant d'un cas-type réalisé par les Réseaux d'élevage (Reuillon, 2008) et l'autre d'enquêtes en exploitations (Jacquot *et al.*, 2010). Cette validation a montré que les règles de pilotage implémentées permettaient à Dynamilk d'avoir un comportement et des réponses cohérents par rapport à la réalité sur le système fourrager. Les rendements et les qualités des fourrages récoltés sont très cohérents avec les références des Tables INRA pour des prairies de montagne et avec les repères donnés dans le cas-type.

Cette validation, bien qu'ayant donné des résultats satisfaisants, peut être considérée comme partielle puisque les jeux de données utilisés étaient eux-mêmes

incomplets. Par exemple, nous n'avons pas pu comparer les résultats liés au pâturage et à l'utilisation de l'herbe. De même, comme l'ont souligné Andrieu (2006) citant les travaux de Mathieu et Raphalen (1981), Dobremez *et al.* (2008) sur les systèmes montagnards et Moulin *et al.* (2009) sur les systèmes d'élevage en zone périméditerranéenne, il est nécessaire de caractériser et de prendre en compte la variabilité des résultats de production fourragère plutôt que de raisonner à travers une année moyenne pour étudier la sensibilité des systèmes fourragers aux aléas climatiques. Or, ni les données « statiques » du cas-type ni les données d'enquêtes sur la gestion du système fourrager effectué sur l'année 2009 ne nous donnent accès à cette variabilité que Dynamilk nous apporte. Par conséquent, il conviendrait de comparer les résultats de Dynamilk sur une période climatique ciblée avec des données fourragères précises (rendement et digestibilité) (par exemple des données fourragères de la ferme expérimentale de Marcenat). Cette validation de la variabilité serait d'autant plus pertinente que nous avons souligné, lors de l'exploration des deux systèmes de production étudiés sur une série climatique longue, que la variation de la qualité des fourrages récoltés d'une année sur l'autre affectait largement les performances animales du système « GA ».

La validation d'un modèle à l'échelle de l'exploitation, comme celle de tout modèle complexe est reconnue comme étant l'une des tâches les plus délicates dans le processus de modélisation (Brown et Kulasiri, 1996 ; Peck, 2004 ; Bellocchi *et al.*, 2010). L'un des moyens, souvent adopté (Andrieu, 2006 ; Jouven, 2006), serait de conduire une validation du modèle global à « **dire d'experts** ». Ce mode de validation permettrait également d'apporter un éclairage sur les résultats apportés par Dynamilk et éventuellement de nuancer certaines solutions pour améliorer les performances animales et l'utilisation des prairies. En effet, Jeuffroy *et al.* (2008) insistent sur la nécessité de mettre en perspective les résultats et les solutions innovantes testées avec de tels outils auprès d'un panel d'experts, agents d'OPA comme des agriculteurs. Effectivement, les modèles à l'échelle de l'exploitation ne représentent qu'une partie de la réalité selon un point de vue et ne prennent en compte qu'une partie de l'ensemble d'une problématique. Par exemple, nous avons mis en valeur des marges de manœuvre importantes sur l'utilisation de l'herbe pâturée permettant d'augmenter considérablement la pression de pâturage. Mais nous n'avons pas pris en compte les phénomènes physiques comme le piétinement des animaux réduisant la productivité de la parcelle, les déjections qui entraînent des zones de refus, le temps de repousse et de repos entre deux passages d'animaux afin d'éviter des problèmes de parasitismes...

9.2.2 Contraintes d'utilisation et domaine de validité

Indépendamment de ce travail de mise en perspective des résultats auprès d'experts, nous pouvons d'ores et déjà identifier les principales contraintes d'utilisation du simulateur Dynamilk compte-tenu de sa construction et portant sur ses trois sous-modèles : troupeau, végétation et décisionnel.

◆ Sous-modèle troupeau

Deux contraintes majeures attenantes à la construction et la modélisation du troupeau limitent le domaine d'utilisation du simulateur : i) la conservation des valeurs des variables d'état d'une catégorie de vaches en lactation à une autre et le besoin de réinitialiser la note d'état ; ii) l'absence de modélisation de l'impact de la conduite du troupeau et de son alimentation sur les aspects de reproduction de ce troupeau. Ces deux limites n'agissent pas au même niveau sur l'utilisation du simulateur. La première contrainte restreint le champ des possibles dans l'élaboration des scénarios alors que la deuxième oblige à nuancer les résultats de simulation.

- Réinitialisation de la note d'état corporel

Comme nous l'avons développé précédemment dans le chapitre 5, le sous-modèle troupeau a été élaboré à l'échelle du lot tout en conservant les informations liées à la distribution des vêlages grâce au concept de l'**animal-pilote**. De façon à modéliser au mieux la courbe de lactation et les processus de mobilisation et reconstitution des réserves corporelles, nous avons créé quatre catégories de vaches en lactation avec les primipares et les multipares d'un côté, et les débuts de lactation et deuxième partie de lactation. Les catégories étant indépendantes les unes des autres, nous avons dû faire face à un verrou mathématique avec l'impossibilité de transmettre les valeurs des variables d'état d'une catégorie à une autre. Ainsi, nous avons mis en place un ensemble de choix de modélisation et de simplification dont les principaux sont i) les vaches en début de lactation utilisent l'ensemble de leurs réserves corporelles mobilisables ii) les vaches, lors de la deuxième partie de lactation, reconstituent leurs réserves corporelles et au moment du tarissement ont une note d'état égale à celle au moment du vêlage.

Ces choix de modélisation nous empêchent *a priori* de simuler des situations de vêlages étalés. En effet, la réinitialisation de la note d'état entre le début et la deuxième partie de lactation est effectuée selon la règle « semaine de début des vêlages + 12 semaines ». Or, cette règle n'est absolument pas pertinente en cas d'étalement des vêlages (quel est le début ? quelle est la fin des vêlages ?).

Comme l'indique la Figure 5, la réinitialisation de la note d'état entre la 12^{ème} et 13^{ème} semaine affecte la courbe d'évolution de la note d'état des vaches en lactation et peut créer un artéfact incohérent avec une courbe réelle de note d'état. De plus, la Figure 5 montre que cet artéfact est d'autant plus important que le potentiel laitier est faible. Ce phénomène est dû au fait que la note d'état est réinitialisée pour les animaux appartenant à la catégorie « deuxième partie de lactation ». Les animaux ayant un faible potentiel laitier reconstituent facilement leurs réserves corporelles compte-tenu de leurs besoins plus faibles comparativement à des animaux à fort potentiel pour un même apport énergétique de la ration offerte (ces simulations ont été réalisées toutes choses égales par ailleurs, donc avec la même qualité de fourrages et la même quantité d'aliments concentrés). Ainsi pour les animaux à fort potentiel laitier, avec cette offre alimentaire, les vaches en deuxième partie de lactation ne peuvent reconstituer leurs

réserves corporelles et la note d'état n'évolue quasiment pas au cours du temps et reste proche de la valeur de la note d'état réinitialisée.

Cependant, nous pouvons nous interroger sur la valeur de cet artéfact (0.20 point de note pour la situation des vêlages étalés pour un potentiel à 6660 kg par lactation) n'est pas acceptable et ne nous laisserait pas la possibilité de simuler des vêlages étalés.

Sur la Figure 5, nous pouvons également commenter la courbe d'évolution de la note d'état de la situation BL15 simulée. En effet, de façon *a priori* surprenante, la note d'état moyenne du lot augmente après la date de début des vêlages. Cependant, compte-tenu de la courbe de distribution des vêlages, groupée sur 6 mois, peu d'animaux démarrent leur lactation en semaine 30 (jour 212), et la majeure partie du troupeau est alors en fin de lactation, période de reconstitution des réserves corporelles. La note d'état stagne puis diminue progressivement une fois le pic de vêlages dépassé, soit, entre fin septembre et novembre.

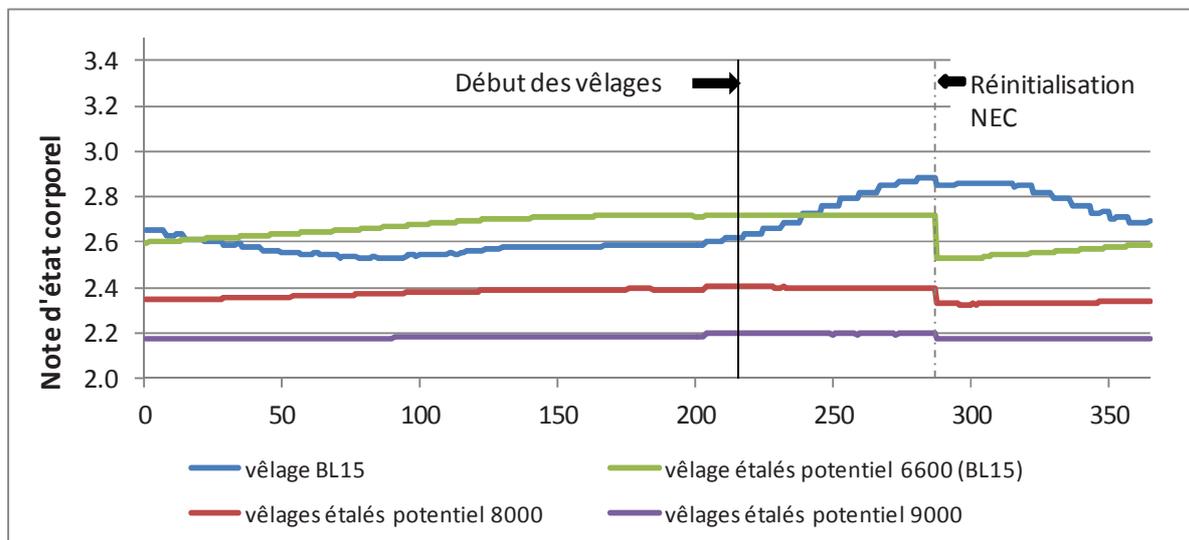


Figure 5 : évolution de la note d'état moyenne des vaches en lactation au cours du temps simulé en fonction de la distribution des vêlages (groupé avec le BL15 ou étalé) et selon le potentiel laitier des vaches laitières

- Impact de la conduite du troupeau et des stratégies d'alimentation sur la reproduction

Compte-tenu de la construction du modèle de démographie, la structure du troupeau est statique avec une durée de lactation, de tarissement et un intervalle-vêlage-vêlage imposé et fixe. Ainsi, bien que réels (Disenhaus *et al.*, 2005 ; Cutullic, 2010) nous avons fait le choix de restreindre les champs de modélisation et de ne pas prendre en compte l'impact de la conduite du troupeau et des stratégies d'alimentation sur les aspects reproduction, longévité de carrière... Ainsi, nous ne pouvons pas simuler des situations, pourtant intéressantes, comme l'allongement de la durée de lactation, un âge au premier vêlage à 30 mois, un troupeau caractérisé par une diversité de niveau de potentiel laitier...

Par ailleurs, au cours de cette thèse, nous avons étudié et montré que le système produisant la majeure partie de la production laitière affichait de bonnes performances aussi bien niveau de la production laitière que dans sa capacité à faire face à des aléas climatiques ou des changements. Or ces systèmes, peu présents sur le terrain, ont également été étudiés par d'autres équipes de recherche (Fiorelli *et al.*, 2010 ; Steinwidder *et al.*, 2010). Ces deux expérimentations ont dû faire face à de gros problèmes de fertilité qu'ils ont résolu soit en avançant le début des vêlages d'un mois (fin d'hiver) (Fiorelli *et al.*, 2010), soit en acceptant d'allonger l'intervalle vêlage-vêlage (Steinwidder *et al.*, 2010).

◆ **Sous-modèles de végétation et décisionnel**

L'une des caractéristiques principales de Dynamilk est le fait que ce soit un modèle dynamique déterministe et non-adaptatif d'une année sur l'autre. En effet, les objectifs de production et la planification des usages des parcelles n'évoluent pas au cours du temps simulé. Or, une source importante de flexibilité des systèmes de production face aux aléas climatiques est les décisions et les ajustements effectués par l'éleveur (Guerin et Agriél, 2007 ; Andrieu *et al.*, 2008). Par exemple dans la réalité, un éleveur peut avoir la possibilité de dimensionner les surfaces attribuées à tel ou tel atelier en fonction des récoltes et de la saison de pâturage de l'année précédente (Coleno et Duru, 1998 ; Andrieu *et al.*, 2008). Il va également prendre en compte l'évolution de la végétation dans la planification annuelle des usages de parcelles (Guerin et Agriél, 2007). Or, dans Dynamilk, la composition botanique des couverts herbacés n'évolue jamais.

Néanmoins, ce manque de flexibilité et d'adaptation de la planification de Dynamilk est nuancé par le fait que les systèmes étudiés sont montagnards et ont donc des usages fortement contraints. Ainsi, Camacho *et al.* (2008) et Dobremez *et al.* (2008) ont souligné que les éleveurs dont l'exploitation était située en zone contraignante avaient peu de latitude dans l'affectation d'un usage à une parcelle.

Nous avons donc construit et validé un outil fonctionnel et cohérent, Dynamilk, nous permettant de simuler des exploitations laitières herbagères en zone contraignante. De par sa construction conceptuelle, Dynamilk est un outil laissant une grande souplesse d'utilisation permettant de simuler et explorer un grand nombre de situations, qu'elles soient réelles ou créées de toute pièce.

9.3 Intérêt et originalité de Dynamilk

9.3.1 Perspectives d'utilisations du modèle

Comme un grand nombre de modèles, le simulateur Dynamilk a été conçu pour être utilisé et exploité avant tout comme un modèle de recherche.

Les conditions nécessaires qu'un tel modèle doit remplir pour favoriser son utilisation par d'autres personnes que son concepteur sont : i) des entrées accessibles ii) des sorties adaptées à la question traitée iii) des formalismes transparents (Jeuffroy *et al.*, 2008). En effet, sans une compréhension claire des hypothèses de construction et de fonctionnement du simulateur, les résultats ne peuvent être interprétés à leur juste valeur.

Dynamilk a été utilisé au printemps 2012 en tant que support lors d'un module d'une dizaine d'heures d'enseignement auprès d'élèves de deuxième année du cursus ingénieur de VetAgro Sup. Ce module est conçu comme une introduction aux enseignements futurs que les élèves suivront lors de leur spécialisation en « Elevage et systèmes de production ». L'objectif sous-jacent de l'utilisation de Dynamilk dans ce module était alors de bénéficier des fonctionnalités et avantages intrinsèques d'un modèle à l'échelle de l'exploitation auprès des étudiants. En effet, un tel modèle permet de représenter explicitement le système de production, d'évaluer l'impact de pratiques sur le système de production et d'être un support de dialogues et d'apprentissage (Moulin *et al.*, 2004 ; Vayssières *et al.*, 2008). Ainsi en traitant la question de l'amélioration de l'autonomie fourragère et alimentaire à l'échelle de l'exploitation à travers l'étude de marges de manœuvre possibles et des conséquences techniques d'un changement sur le système de production, le travail devait permettre aux étudiants de mieux comprendre le fonctionnement et la dynamique d'une exploitation laitière herbagère et les interactions entre ses différentes composantes.

Ainsi les étudiants, par groupes, ont proposé des leviers possibles qui leur semblaient intéressants et pertinents d'étudier pour améliorer le degré d'autonomie. Ils ont paramétré les fichiers d'entrée de la situation de base, commune à tous les groupes (le cas-type BL15 des Réseaux d'élevage). Chaque groupe a ensuite paramétré sa situation à tester, à partir des fichiers correspondant au BL15. Les questions précises testées par les étudiants sont reliées à :

- ◆ des aspects zootechniques avec l'impact du niveau de potentiel laitier (de 6600 à 8000 litres) ou d'une distribution des vêlages concentrée de janvier à mars
- ◆ aux caractéristiques structurelles de l'exploitation avec l'impact de la composition botanique des prairies (parcelles ayant une composition botanique très précoce ou très tardive)
- ◆ la gestion de l'éleveur appliquée au système de production avec l'importance de la gestion du pâturage sur l'utilisation de l'herbe au pâturage et la production laitière

réalisée (comparaison d'une gestion du pâturage sévère avec une situation normale ou libérale privilégiant la production laitière

- ♦ la constitution des stocks fourragers et de leur qualité avec un système tout foin dont les caractéristiques peuvent s'apparenter au foin séché en grange et une étude de l'impact du déprimage sur la quantité et la qualité des stocks fourragers récoltés

Les étudiants ont ensuite analysé les résultats des simulations selon les indicateurs synthétiques générés par le programme macro VBA de traitement des résultats bruts sur les aspects reliés à la production laitière, l'autonomie, les rendements et la qualité des fourrages récoltés, le bilan fourrager et l'utilisation de l'herbe pâturée.

L'utilisation du simulateur Dynamilk à des fins pédagogiques a donc été un succès puisque les étudiants ont pu mener une étude complète, de la mise en place d'une question à traiter à l'analyse des résultats en passant par le paramétrage des fichiers d'entrées et des résultats de simulations. Toutefois, la prise en main du simulateur nécessite une présentation complète et précise des concepts et des postulats ayant servi à la construction du simulateur et au fonctionnement concret de Dynamilk. Cette étape est d'autant plus fondamentale que l'analyse des résultats des simulations doit se faire avec un regard critique en ne perdant pas de vue qu'un modèle n'est qu'une représentation simplifiée de la réalité selon un point de vue (Moulin *et al.*, 2004 ; Peck, 2004)

Par ailleurs, pour diffuser cet outil, toujours à des fins pédagogiques mais aussi auprès de conseillers techniques d'organisations professionnelles agricoles (OPA), (conseillers en élevage, personnels de l'interprofession ou instituts techniques), il conviendrait d'améliorer considérablement le traitement des résultats bruts en simplifiant les résultats présentés (un ensemble de résultats et calculs intermédiaires sont actuellement présents et affichés, rendant un peu difficiles d'accès les informations primordiales à analyser). De même, pour qu'il puisse être pleinement utilisé en tant qu'outil par des conseillers techniques, il serait approprié de développer un ensemble d'indicateurs de pilotage technique proches de ceux utilisés quotidiennement par les conseillers. En effet, la diffusion d'un outil ne peut se faire sans que des conseillers ou même des agriculteurs s'approprient l'outil, voire qu'ils développent leurs propres indicateurs (Carberry *et al.*, 2002 ; Vayssières *et al.*, 2008). Ces indicateurs pourraient être des bilans alimentaires par catégories et par saison, des taux d'utilisation de la biomasse offerte au pâturage aux animaux, des surfaces allouées et disponibles au pâturage tenant compte des effectifs fluctuant au cours de la saison de pâturage, la possibilité de créer des calendriers de pâturage de quelques années intéressantes... L'ensemble de ces indicateurs peuvent être actuellement recalculés « à la main » ce qui représente une certaine lourdeur et donc, une limite à la diffusion de Dynamilk sous sa forme présente.

Ainsi les utilisations futures de Dynamilk sont à envisager selon trois grandes finalités :

◆ Recherche :

Dynamilk peut continuer à être utilisé en tant qu'outil de recherche afin d'explorer et répondre à des problématiques liées aux exploitations laitières herbagères. Il peut notamment être utilisé en tant qu'outil de prospective afin de tester l'impact de changements climatiques sur les performances et la durabilité de ces systèmes avec la création de séries climatiques artificielles avec répétitions d'aléas par exemple.

Dynamilk étant un modèle axé sur les aspects biotechniques de la production laitière, il ne permet pas de prendre en compte les dimensions sociales et économiques directement dans les questions de recherche abordées. Ainsi, pour acquérir une vision plus globale et exhaustive, Dynamilk pourrait être utilisé conjointement avec des modèles économiques tels que Opt'Inra (Veysset *et al.*, 2000 ; Veysset *et al.*, 2009). Cette démarche a d'ores et déjà été adoptée avec succès par Rotz *et al.* (1999), Schils *et al.*, (2007) ou encore Herrero *et al.* (1999). Ces derniers auteurs combinent un outil de simulation biotechnique et des modèles de décisions multicritères afin d'étudier la meilleure combinaison de ressources pour produire du lait sur les hauts-plateaux du Costa-Rica en prenant en compte les aspects techniques (troupeau, prairies), économiques (intrants) et sociaux (nombre de travailleurs).

Dynamilk peut également être un support en appui à la recherche. Comme l'indiquait Jeuffroy *et al.* (2008) à propos des modèles développés en agronomie, ces outils peuvent servir à explorer *ex-ante* diverses situations et aider à l'élaboration de protocoles expérimentaux les plus judicieux et pertinents possibles. En effet, dans le cadre de l'expérimentation « système », la mise en place de tels protocoles est très coûteuse et ne peut se faire qu'à bon escient.

◆ Pédagogie :

Comme nous l'avons vu précédemment, Dynamilk a d'ores et déjà été utilisé à des fins pédagogiques et pourra continuer de l'être.

◆ Développement :

Selon la définition du conseil technique donnée par Papy (1994), qui consiste à alimenter le pool de connaissances de nouvelles références techniques, Dynamilk pourrait être utilisé dans ce cadre-là du fait de sa capacité à reproduire un ensemble divers de systèmes de production et à jouer sur un grand nombre de paramètres d'entrée. Ainsi, un ensemble de questions explorant les problèmes actuels et futurs des éleveurs pourrait être traité (en association avec d'autres types d'études). Par exemple, l'impact de conditions climatiques changeantes sur la constitution des stocks fourragers et sur leur qualité dans le cadre de systèmes de production sous contraintes telles que les élevages adhérents à des cahiers des charges AOP tels que le saint-nectaire où la question de la suppression des fourrages fermentés se pose encore.

Plus largement, Dynamilk pourrait être utilisé dans le cadre de travaux réunissant le monde de la recherche, des OPA et des éleveurs à travers des démarches

participatives telles que celles que *l'Agricultural Production Systems Research Unit* a par exemple développé (Carberry *et al.*, 2002 ; McCown *et al.*, 2012). L'objectif de ce groupe est la production de connaissances, notamment en exploitant des outils de simulations, afin de conduire à de nouvelles pratiques en partant du postulat que les pratiques ne peuvent changer sans une participation active des éleveurs dans ce processus de recherche (Carberry *et al.*, 2002). Cette collaboration entre chercheurs et experts autour de travaux de simulation peut également conduire à de nouveaux axes de simulations et de recherche sous l'impulsion des experts.

9.3.2 Perspectives d'évolutions du modèle

Dynamilk est un outil considéré comme validé, fonctionnel et utilisable sous sa forme actuelle. Cependant, plusieurs points pourraient être améliorés, perfectionnés ou modifiés. Ces aménagements peuvent porter d'une part, sur la fonctionnalité et le domaine valide d'utilisation du simulateur Dynamilk et, d'autre part, sur de nouvelles fonctionnalités permettant de répondre de façon plus exhaustive à des problématiques de recherche.

En restant dans le cadre d'un simulateur ayant pour objectif de traiter la question du compromis entre production laitière et valorisation de l'herbe, les principales évolutions à apporter pourraient porter sur :

- ◆ La structure du simulateur

Comme nous l'avons vu précédemment, le découpage du lot des vaches en lactation en quatre catégories permet de mieux modéliser les processus et caractéristiques liés à la lactation. Cependant, un verrou mathématique nous empêche de conserver les informations associées d'une catégorie d'animal à une autre. Afin de pouvoir simuler des systèmes de production basés sur des vêlages étalés tout au long de l'année, il conviendrait de trouver une solution mathématique et/ou informatique.

- ◆ Les règles de décision

Les règles de décision implémentées dans Dynamilk ont été conçues de manière à ce qu'elles soient les plus simples et efficaces possible, même si elles sont un peu frustrées. Une complexification des règles de décision aurait pu engendrer des résultats plutôt surprenants et une plus grande difficulté d'interprétation des résultats (Coquillard et Hill, 1997 ; Andrieu, 2006).

Néanmoins, certains points peuvent être améliorés ultérieurement, tels que les règles de gestion des surfaces fourragères, du déplacement des lots de parcelles en parcelles, les périodes de transition alimentaire.

En effet, comme nous l'avons vu précédemment avec les résultats de simulations, les surfaces pâturables permettent d'assurer une offre herbagère suffisante pour maintenir des performances élevées même en situation de chargement élevé. En parallèle, le rapport entre fauche et pâture au printemps semble prépondérant dans

l'élaboration de l'équilibre entre performances productives et bilan fourrager à l'équilibre ou excédentaire. Ainsi, tout en conservant une planification *a priori*, la mise en place de **surfaces « tampons »** et de **règles d'ajustement** de l'usage de ces dernières permettrait une plus grande souplesse dans la gestion de l'offre herbagère et d'atténuer l'impact de cette planification rigide sur les bilans fourragers ou les périodes de « trou d'herbe ». Ainsi, Bellon *et al.* (2004) montrent que ces ajustements permettent aux systèmes de production de s'adapter à l'offre herbagère et fourragère et de surmonter les périodes de soudures. Par conséquent, certaines parcelles pourraient voir leur usage (fauche ou pâture) modifié au cours de la saison de pâturage en fonction des stocks d'herbe sur pied et des jours d'avance. Ce concept développé par Duru *et al.* (1988) repose sur la notion de trésorerie fourragère qui permet d'évaluer la quantité de l'offre herbagère et de réattribuer cette offre, excédentaire à la constitution de stocks supplémentaires ou déficitaires à l'agrandissement des surfaces pâturables (Moreau, 2009). Ce concept a démontré sa cohérence par rapport aux pratiques des éleveurs (Lacey et Theau, 2008) et a d'ores et déjà été mis en pratique dans les modèles développés par Andrieu (2006) et Jouven (2006) ou fait l'objet d'outils d'aide à la gestion du pâturage (Hardy *et al.*, 2001).

Par ailleurs, **le choix d'une parcelle lors du déplacement d'un lot** au pâturage s'effectue selon sa disponibilité, son usage planifié et une hauteur d'herbe suffisante. Actuellement, les critères prépondérants dans le choix d'une parcelle sont avant tout sa productivité, déterminée par la composition botanique et les caractéristiques agronomiques et son usage spécifique. En effet, comme le montre la Figure 3, le nombre de passages du lot des vaches en lactation sur les parcelles les plus productives est de quatre contre deux sur celles moins productives. Ainsi, ces règles pourraient être complexifiées par la suite pour intégrer la distance entre les parcelles afin de prendre en compte indirectement la notion de travail de l'éleveur (Garcia-Launay *et al.*, 2011). De même, le temps de repos entre deux passages de lot pourrait être pertinent à mettre en place pour tenir compte par exemple des préconisations contre le parasitisme. Ainsi, sur la Figure 3, nous pouvons voir que plusieurs lots d'animaux suivés se succèdent sur une parcelle. C'est mathématiquement logique puisque la hauteur d'herbe est suffisante pour accueillir un nouveau lot, mais ce n'est pas cohérent avec les pratiques réelles des éleveurs.

Dynamilk ne permet pas de prendre en compte les **périodes de transitions alimentaires** aux périodes de mise à l'herbe ou de rentrée étable. De la même manière, en cas de manque de parcelles disponibles pour accueillir un lot du fait d'une hauteur d'herbe non suffisante, les animaux reçoivent directement une ration hivernale au pâturage, considérant qu'ils ne pâturent plus. Une modification des règles de gestion de l'alimentation permettant une ingestion concomitante d'herbe pâturée et de fourrages conservés permettrait de prendre en compte ces périodes de transition. Les équations

reliées à l'ingestion au pâturage sont déjà implémentées de façon à pouvoir gérer la complémentation fourragère (Faverdin *et al.*, 2007).

- ◆ Le traitement des résultats de simulation

Comme nous l'avons développé précédemment, Dynamilk nous permet **d'accéder à un grand nombre de données sur l'évolution du système de production** et de ses composantes. Nous avons ainsi mis au point des indicateurs et des résultats synthétiques nous permettant d'analyser les systèmes simulés principalement sur les variables liées à la production laitière, l'utilisation de l'herbe, les rendements fourragers, les stocks et leur qualité et l'autonomie alimentaire et fourragère. Ainsi, en apparence, nous n'avons exploité qu'une partie de la masse de résultats générés par Dynamilk. Toutefois, tous ces indicateurs sont construits de façon à prendre en compte l'évolution permanente du système au jour le jour. Par exemple, les valeurs de fourrages consommés par un lot qui sont présentées dans les résultats de simulation ne sont pas des valeurs moyennes brutes, mais sont des valeurs calculées en tenant compte de l'ingestion quotidienne réelle de l'animal-pilote pondérée par l'effectif du lot chaque jour. De plus, l'accès aux résultats bruts a permis de vérifier lors de l'implémentation et de la validation la cohérence de son fonctionnement. De même, l'interprétation des indicateurs synthétiques nécessite parfois de connaître une variable précise dans le détail : par l'exemple les temps de séjour sur les parcelles (résultats bruts) ont apporté un complément d'information permettant de commenter les taux d'utilisation de la biomasse produite par les vaches en lactation sur une parcelle.

Comme expliqué précédemment, pour que Dynamilk puisse être utilisé auprès de différents acteurs, il serait adéquat de retravailler les indicateurs et résultats synthétiques pour **renforcer leur lisibilité**.

L'un des avantages de l'outil Dynamilk est la possibilité d'étudier la **variabilité** de l'évolution des composantes du système de production d'une année sur l'autre, information complémentaire par rapport aux référentiels édités par les Réseaux d'Élevage par exemple. Grâce à la construction du simulateur utilisant le concept de « saisons-pratiques » (Bellon *et al.*, 1999), cette variabilité peut s'étudier également **entre les saisons** et par conséquent, identifier les systèmes plus sensibles à une sécheresse estivale ou en situation de sous utilisation des ressources herbagères au printemps ou en automne. Développer cet aspect permettrait de pouvoir analyser plus finement les marges de sécurité du système fourrager par saison et d'élaborer *ex-post* des systèmes plus robustes. Ce développement pourrait s'inspirer des concepts élaborés par Dobremez *et al.* (2008) sur la sécurisation du système fourrager.

Parmi les résultats de simulation analysés, nous n'avons pas étudié l'impact des systèmes explorés sur la diversité floristique. Les résultats ont montré qu'il existait au sein des systèmes simulés, même les plus chargés, des marges de manœuvre dans l'utilisation de la biomasse pâturable. Mais quel est l'impact d'une plus grande pression d'utilisation de l'herbe pâturée sur les couverts herbacés, leur capacité à repousser et

leur diversité floristique? Par conséquent, le développement d'indicateurs révélateurs de cet impact serait approprié. Nous pourrions nous inspirer de la **note de biodiversité** élaborée par Jouven *et al.* (2007) ou de **pratiques en adéquation avec des préconisations** faites pour préserver la biodiversité (Farruggia *et al.*, 2010 ; Nettier *et al.*, 2010b).

Outre ces évolutions possibles décrites, de plus amples modifications pourraient être apportées afin de modéliser plus finement les systèmes laitiers herbagers situés en zones contraignantes et leurs spécificités. Un levier important dans la recherche d'un plus grand degré d'autonomie fourragère et alimentaire est la **fertilisation** (Fleury *et al.*, 1996 ; Gruber *et al.*, 1999 ; Peyraud et Delaby, 2005 ; Pottier *et al.*, 2009 ; Nettier *et al.*, 2010a). L'indice de nutrition utilisé par le module de croissance de l'herbe (Jouven *et al.*, 2006b) permet de prendre en compte un milieu plus ou moins fertile, mais pas des apports de fertilisants. **Modéliser « la voie azotée »** dans le modèle de croissance des couverts herbacés permettrait également de connaître la matière azotée totale (MAT) et par conséquent, les protéines digestibles dans l'intestin (PDI) des fourrages récoltés (Baumont *et al.*, 2007 ; Favardin *et al.*, 2007).

Par ailleurs, puisque Dynamilk a été conçu de façon à pouvoir prendre en compte les contraintes de cahiers des charges de produits labellisés, il conviendrait d'étudier l'impact de la recherche des compromis possibles entre performances animales et utilisation des ressources sur la **qualité et la composition du lait produit** (Coulon *et al.*, 2005 ; Farruggia *et al.*, 2009 ; Martin *et al.*, 2009).

En l'état actuel des choses, Dynamilk est toutefois un simulateur validé, qui fonctionne et fournit des résultats. Il correspond à un travail de thèse mené dans un temps limité et par une équipe réduite centrée sur une seule personne, la doctorante. Dynamilk constitue donc une étape importante dans l'étude de la modélisation des compromis qu'il est possible d'atteindre entre productions animales, utilisation des ressources alimentaires, fourragères et herbagères et recherche d'un plus grand degré d'autonomie fourragère et alimentaire à l'échelle de l'exploitation. Il convient de poursuivre ce travail en passant maintenant à une seconde étape si possible appuyée par une équipe élargie permettant de traiter tant des questions de recherche, comme la constitution *ex-ante* de systèmes novateurs, que des questions développement. Ces dernières peuvent s'effectuer en liaison avec des organismes de développement tels que le Pôle Fromager AOC Massif Central en étudiant une variété de questions pratiques que se posent les agents sur le terrain.

Conclusion

CONCLUSION

L'objectif de ce travail de thèse était d'étudier les systèmes bovins laitiers herbagers en zone contraignante et leurs marges de manœuvres pour améliorer leur degré d'autonomie alimentaire et fourragère à l'échelle de l'exploitation, tout en assurant des performances animales et une utilisation durable des ressources satisfaisantes sur des durées pluriannuelles présentant des aléas climatiques. L'hypothèse centrale de ce travail pose qu'une meilleure adéquation entre la dynamique des besoins alimentaires des animaux et la dynamique de l'offre herbagère et fourragère permet d'améliorer les compromis entre autonomie et performances productives ainsi que le maintien de ces compromis dans un contexte de perturbations.

Pour répondre à ces questions et valider notre hypothèse, nous avons utilisé une approche par modélisation en créant un outil de simulation dynamique et déterministe, Dynamilk. En simulant différents systèmes de production reposant sur des stratégies contrastées, il permet de comprendre le fonctionnement et l'évolution des différentes composantes du système de production, d'étudier l'impact de contraintes structurelles ou de production, et d'estimer leurs capacités à faire face à des changements, que ce soient des aléas climatiques ou des changements de contraintes...

Nous avons donc développé le simulateur Dynamilk représentant le fonctionnement d'une exploitation laitière herbagère située en montagne. Cette thèse se situant dans la continuité des travaux de Magali Jouven qui avait développé le simulateur Sebien, nous avons choisi de reprendre le modèle de croissance de l'herbe qu'elle avait développé, validé et qui est parfaitement fonctionnel pour simuler la dynamique de production et de qualité de différents types de prairies permanentes en zone climatique continentale. Nous avons en revanche concentré notre effort de modélisation sur :

- **la représentation du troupeau laitier** avec le module de démographie permettant de prendre en compte les informations liées à la distribution des vêlages, l'évolution physiologique ou la croissance des différentes catégories d'animaux tout en conservant l'unité de simulation à l'échelle du lot, mais en imposant le respect d'un cycle annuel et sa reproduction d'une année sur l'autre
- **le développement du modèle dynamique d'ingestion, de production et de mobilisation des réserves corporelles des vaches en lactation** permettant de modéliser la production laitière comme étant la résultante des besoins énergétiques nécessaires à la production potentielle, et de l'énergie apportée par la ration et de la capacité des animaux à mobiliser ou reconstituer leurs réserves corporelles. Pour cela, deux modèles spécifiques ont été développés : l'un permet de considérer la période où l'offre alimentaire est connue et stable, l'alimentation en stabulation, et l'autre la période où l'offre, en quantité comme en qualité, est variable d'un jour à l'autre, le pâturage. Ces modèles intègrent les concepts développés par l'équipe de l'INRA de Rennes sur la régulation de l'ingestion

et de la production des vaches laitières et l'INRA de Theix sur l'interaction herbe animal.

- **le développement de modèles dynamiques d'ingestion et de production pour le reste du troupeau** : les vaches tarées et les différents lots de génisses. Bien que simplifié par le choix de nourrir les animaux tarés et en croissance en fixant leurs apports aux besoins définis, le développement de tels modèles, au pâturage comme en stabulation a permis de ne pas négliger l'impact des lots de renouvellement sur l'autonomie fourragère et alimentaire du système d'exploitation, dans l'ingestion totale de fourrages consommés et donc dans la valorisation de l'espace au pâturage.
- **les règles de planification et de pilotage** de gestion du système fourrager, permettant de prendre en compte *a priori* les contraintes physiques du parcellaire et les objectifs de production de l'éleveur. A ce niveau nous avons mobilisé le concept de « saisons-pratiques », et construit un ensemble de règles biotechniques permettant au simulateur, à partir des informations délivrées par les sous-modèles biologiques, de réaliser les fauches, de gérer les stocks de fourrages, et de gérer le pâturage en reprenant les règles du modèle Paturin.

Une fois le développement de Dynamilk achevé, nous avons validé le modèle troupeau et animal sur le critère de la réponse en lait à l'auge et au pâturage, et le modèle global sur les variables du système fourrager et les niveaux de consommation de fourrages du troupeau.

Avec cet outil validé et fonctionnel, nous avons pu réaliser avec succès un ensemble de simulations afin de tester deux systèmes de production contrastés reposant sur des distributions des vêlages distinctes. Nous avons pu mettre en place un plan d'expérimentation *in silico* permettant d'explorer les capacités de ces deux systèmes à maintenir des niveaux de performances productives et d'autonomie alimentaire et fourragère dans un contexte de changements.

En résumé, l'intérêt et les apports de Dynamilk se déclinent à deux niveaux :

- i) La capacité à produire une vision dynamique et pluriannuelle du fonctionnement de systèmes d'élevage laitiers herbagers, en réponse à des séries climatiques longues pouvant présenter différents types d'aléas climatiques
- ii) La capacité à tester des modifications dans la structure et le pilotage du système ce qui permet d'établir des lois de réponse à un changement, de développer une approche itérative face à une situation nouvelle, voire la conception pas à pas de systèmes innovants.

La conclusion étant la matérialisation de l'aboutissement de ce manuscrit mais aussi, de ce travail de thèse, je souhaitais effectuer un bilan de l'élaboration de l'outil Dynamilk et du travail de thèse en tant que « projet » (c'est pourquoi, j'utiliserai dorénavant le « je » au lieu du « nous »).

Construire un outil de simulation n'est pas qu'un objectif en soi. Cette réalisation nécessite de nombreuses étapes, de longs moments de réflexions et de conceptualisation avant d'aboutir à un outil fonctionnel. Au cours de cette thèse, j'ai ainsi mis en place une démarche complète et aboutie de modélisation avec successivement les étapes de conceptualisation et d'élaboration du modèle conceptuel, d'implémentation de l'outil et de vérification de son fonctionnement et de sa cohérence, de validation et enfin d'exploitation afin de répondre aux questions de recherche.

La création du modèle conceptuel en utilisant l'approche systémique m'a permis d'analyser et décomposer le fonctionnement biotechnique et la conduite du système de production d'une exploitation laitière, de conceptualiser ce fonctionnement en sélectionnant tous les éléments essentiels, en se référant toujours à l'objectif de recherche, mais tout en gardant une cohérence et un niveau de simplification identique au sein des différentes composantes du modèle. Dynamilk n'est, par ailleurs, pas uniquement le fruit de mon travail, de nombreuses personnes ont collaboré à sa création, que ce soient des zootechniciens pour la phase conceptuelle ou des informaticiens pour la phase implémentation et développement de l'outil. Collaborer avec diverses personnes, mettre en œuvre et en forme (ou restreindre) les idées de chacun, développer une communication pour faire le lien entre le langage agronomique ou zootechnique et le langage informatique, se former à la pensée « objet/UML » et au langage de programmation informatique furent autant d'éléments particulièrement enrichissants et formateurs dans mon parcours de doctorante.

Progressivement, j'ai pris en charge le pilotage et la responsabilité de ce projet, développant une rigueur et une autonomie de travail pour gérer les différentes étapes en fonction des agendas des autres intervenants.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Adams DC, Clark RT, Klopfenstein TJ et Volesky JD 1996. Matching the cow with forage resources. *Rangelands* 18 (2), p. 57-62.

Agabriel J et Meschy F 2007. Alimentation des veaux et génisses d'élevage. In Alimentation des bovins, ovins et caprins - Besoins des animaux - Valeur des aliments - Tables INRA 2007, p. 307, Editions Quae, Paris.

Agreste 1999. Agreste primeur - La statistique agricole. Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, Paris, 4 p.

Agreste 2000. Une exploitation française sur cinq est située en zones de montagne. In Cahiers, pp. 25-29, Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, Paris.

Agreste 2011a. Productions animales. In GraphAgri 2011, pp. 138-156, Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation, de la Pêche, de la Ruralité et de l'Aménagement du Territoire, Paris.

Agreste 2011b. Météorologie, utilisation du territoire. In GraphAgri 2011, pp. 9-13, Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation, de la Pêche, de la Ruralité et de l'Aménagement du Territoire, Paris.

Andrieu J, Béranger C, Demarquilly C, Dulphy J-P, Gea Y, Hoden A, Jarrige R, Jounert M, Liénard G, Petit M, Rémond B, Theriez M, Thivend P et Legendre J 1976. Alimentation des ruminants en période de pénurie fourragère - Note INRA ITEBE au Ministère de l'Agriculture. 25 p.

Andrieu N (2006). Diversité du territoire de l'exploitation d'élevage et sensibilité du système fourrager aux aléas climatiques : étude empirique et modélisation. Agronomie. Thèse de Doctorat, AgroParisTech - Ecole Doctorale Abies Paris, 314 p.

Andrieu N, Coléno F et Duru M 2008. L'organisation du système fourrager source de flexibilité face aux variations climatiques. In L'élevage en mouvement - flexibilité et adaptation des exploitations herbivores, pp. 95-110, Editions Quae, Paris.

Aubron C, Lurette A et Moulin C-H 2010. Simulation des conséquences économiques de différentes stratégies fourragères avec foin face aux aléas climatiques en élevage bovin laitier. In 17^{èmes} Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants, , pp. 249-252, Institut de l'Élevage, Paris.

Barjolle D et Sylvander B 2003. Facteurs de succès des produits d'origine certifiée dans les filières agro-alimentaires en Europe : marché, ressources et institutions. *INRA Productions Animales* 16, 289-293.

Baumont R, Jouven M, Deux N et Farruggia A 2008. How can farms with beef cattle systems based on permanent pasture cope with extreme climatic years? Results of a study using the whole-farm simulator SEBIEN. In Empowerment of the rural actors: a renewal of farming systems perspectives: 8th European IFSA Symposium, , 6-10 July 2008, pp. 435-444, Clermont-Ferrand, France.

Baumont R, Dulphy J-P, Sauvant D, Meschy F, Aufrère J et Peyraud J-L 2007. Valeur alimentaire des fourrages et des matières premières: tables et prévision. In Alimentation

des bovins, ovins et caprins - Besoins des animaux - Valeur des aliments - Tables INRA 2007, p. 307, Editions Quae.

Baumont R, Plantureux, S., Farrié, J-P., Launay, F., Michaud, A., Pottier, E., 2011. Prairies permanentes - des références pour valoriser leur diversité. Institut de l'Elevage, Paris, 128 p.

Bellocchi G, Rivington M, Donatelli M et Matthews K 2010. Validation of biophysical models: issues and methodologies. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 30, 109-130.

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

Bellon S, Guerin G et Leger F 2004. Anticiper les aléas climatiques en programmant des sécurités. In Options Méditerranéennes. Série A, Séminaires Méditerranéens, pp. 137-140.

Bellon S, Chatelin MH, Guerin G, Havet A et Moreau JC 1995. Analyse de la conduite du pâturage au printemps. *Fourrages*, 33-55.

Beranger C 1999. Les productions alternatives et de qualité dans les zones de montagne défavorisées. *Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France* 85, 97-105.

Bérard L et Marchenay P 1995. La construction sociale des produits de terroir. *Terrain* 24, 153-164.

Bérard L et Marchenay P 1998. Avant-propos : Patrimoine vivant, montagne et biodiversité. *Revue de Géographie Alpine*, 7-14.

Bernuès A, Ruiz R, Olaizola A, Villalba D et Casasus I 2011. Sustainability of pasture-based livestock farming systems in the European Mediterranean context: Synergies and trade-offs. *Livestock Science* 139, 44-57.

Beukes PC, Palliser CC, Macdonald KA, Lancaster JAS, Levy G, Thorrold BS et Wastney ME 2008. Evaluation of a whole-farm model for pasture-based dairy systems. *Journal of Dairy Science* 91, 2353-2360.

Blanc F, Bocquier F, Agabriel J, D'Hour P et Chilliard Y 2008a. La composante animale de la flexibilité des systèmes d'élevage. In L'élevage en mouvement : Flexibilité et adaptation des exploitations d'herbivores, pp. 73-94, Editions Quae, Paris.

Blanc F, Bocquier F, Agabriel J, D'Hour P et Chilliard Y 2008b. La composante animale de la flexibilité des systèmes d'élevage. In L'élevage en mouvement - flexibilité et adaptation des exploitations herbivores, pp. 23-36, Editions Quae, Paris.

Blanc F, Dumont B, Brunschwig G, Bocquier F et Agabriel J 2010a. Extensive ruminant farming systems highlight animal coping processes based on robustness, flexibility and plasticity. *Productions Animales* 23, 65-80.

Blanc F, Dumont B, Brunschwig G, Bocquier F et Agabriel J 2010b. Extensive ruminant farming systems highlight animal coping processes based on robustness, flexibility and plasticity. *INRA Productions Animales* 23, 65-80.

Blanc F, Bocquier F, Debus N, Agabriel J, D'Hour P et Chilliard Y 2004. La pérennité et la durabilité des élevages de ruminants dépendent des capacités adaptatives des femelles. *INRA Productions Animales* 17, 287-302.

Blanco M-A (2010). Analyse et développement d'un simulateur en système d'élevage bovin laitier de montagne. Informatique. Rapport de Master Institut Supérieur d'Informatique de Modélisation et de leurs Applications, Clermont-Ferrand, 51 p.

Bocquier F et Gonzalez-Garcia E 2009. Sustainability of ruminant agriculture in the new context: feeding strategies and features of animal adaptability into the necessary holistic approach. *Animal* 4, 1258-1273.

Bonneviale J-R, Jussuiau R et Marshall E 1989. Approche Globale de l'exploitation agricole. INRAP, Dijon, 328 p.

Borshchev A et Filippov A 2004. From system dynamics and discrete Event to practical agent based modeling: reasons, techniques, tools. In the 22nd International Conference of the system dynamics society, Keble College, Oxford.

Bouzida S, Ghozlane F, Allane M, Yakhlef H et Abdelguerfi A 2010. Effect of the stocking rate and of the diversification of the forages on the production of the dairy cows in the region of Tizi-Ouzou (Algeria). *Fourrages*, 269-275.

Boyazoglu J 1998. Livestock farming as a factor of environmental, social and economic stability with special reference to research. *Livestock Production Science* 57, 1-14.

Brossier J 1987. Système et système de production - Note sur ces concepts. *Cahier des Sciences Humaines* 23, 377-390.

Brown TN et Kulasiri D 1996. Validating models of complex, stochastic, biological systems. *Ecological Modelling* 86, 129-134.

Brun-Lafleur L (2011). Modélisation du fonctionnement d'un troupeau laitier pour anticiper les conséquences de son pilotage. Biologie et Agronomie. Thèse de Doctorat, UEB, Rennes, 260 p.

Brun-Lafleur L, Delaby L, Husson F et Faverdin P 2010. Predicting energy x protein interaction on milk yield and milk composition in dairy cows. *Journal of Dairy Science* 93, 4128-4143.

Brun-Lafleur L. (2011). Modélisation du fonctionnement d'un troupeau laitier pour anticiper les conséquences de son pilotage. biologie et agronomie, ueb, rennes p.

Brundtland GH 1987. Our Common Future - Call for Action In World Commission on Environment and Development. 291-294 p.

Brunschwig G, Bernhard C, Malpel L et Chevillot B. 2002. Les contraintes du parcellaire dans le fonctionnement des systèmes fourragers d'exploitations laitières. In 9 emes Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants, p. 119, Institut de l'Elevage, Paris.

Brunschwig G, Sibra C, Chevillot B, Delbruel B, Michelin Y et Valadier G 2000. Terroirs d'élevage laitier du Massif Central: Identification et caractérisation - Eléments de méthode - Analyses et résultats - Collection Etudes. Enita, Clermont-Ferrand, 223 p.

- Burkhard B, Fath BD et Muller F 2011. Adapting the adaptive cycle: Hypotheses on the development of ecosystem properties and services. *Ecological Modelling* 222, 2878-2890.
- Buttchereit N, Stamer E, Junge W et Thaller G 2010. Evaluation of five lactation curve models fitted for fat:protein ratio of milk and daily energy balance. *Journal of Dairy Science* 93, 1702-1712.
- Calub AD, Anwarhan H et Roder W 1996. Livestock production systems for Imperata grasslands. *Agroforestry Systems* 36, 121-128.
- Camacho O, Dobremez L et Capillon A 2008. Des broussailles dans les prairies alpines : organisation spatiale de l'activité et pratiques des éleveurs en vallée d'Abondance (Haute Savoie, France). *Revue de Géographie Alpine* 96, 77-87.
- Carberry PS, Hochman Z, McCown RL, Dalgliesh NP, Foale MA, Poulton PL, Hargreaves JNG, Hargreaves DMG, Cawthray S, Hillcoat N et Robertson MJ 2002. The FARMSCAPE approach to decision support: farmers', advisers', researchers' monitoring, simulation, communication and performance evaluation. *Agricultural Systems* 74, 141-177.
- Casasus I, Bernues A, Sanz A, Villalba D, Riedel JL et Revilla R 2007. Vegetation dynamics in Mediterranean forest pastures as affected by beef cattle grazing. *Agriculture Ecosystems & Environment* 121, 365-370.
- Chardon X (2008). Evaluation environnementale des exploitations laitières par modélisation dynamique de leur fonctionnement et des flux de matière: développement et application du simulateur mélodie. Agronomie. Thèse de Doctorat, UEB, Rennes, FRA, 282 p.
- Chatellier V et Delattre F 2003. La production laitière dans les montagnes françaises : une dynamique particulière pour les Alpes du Nord. *INRA Productions Animales* 16, 61-76.
- Chatellier V et Delattre F 2005. Les soutiens directs et le découplage dans les exploitations agricoles de montagne. *Economie rurale. Agricultures, alimentations, territoires*, 40-56.
- Chatellier V et Guyomard H 2008. Le bilan de santé de la PAC, le découplage et l'élevage en zones difficiles². *INRA Sciences sociales - Recherches en économie et sociologie rurales* 6.
- Chatellier V et Guyomard H 2010. Le bilan de santé de la PAC et le rééquilibrage des soutiens à l'agriculture française. *Economie Rurale*, 4-20.
- Chatellier V, Delattre F et Michaud M 2004. Le découplage et le paiement unique dans les exploitations agricoles de montagne - Le contexte et les enjeux liés à l'application du découplage, l'estimation du montant du paiement unique et les incitations aux réorientations productives. GIS Rhône-Alpes, INRA, 63 p.
- Chatellier V, Delattre F et Rat-Aspert O 2006. Le prix du lait en Savoie et les filières fromagères AOC - Principales évolutions passées et perspectives. GIS Alpes du Nord, Chambéry, 67 p.

Chatellier V, Vollet D, Dobremez L et Josien E 2008. Evolutions possibles des politiques publiques de soutien aux systèmes herbagers. In *Prairies, herbivores, territoires : quels enjeux ?*, pp. 129-155, Editions Quae, Paris.

Chénaïs F, Seuret J-M, Brunschwig P et Fiorelli JL 2001. Pour un rôle croissant du pâturage dans les systèmes bovins laitiers. *Fourrages* 166, 257-277

Chilliard Y, Remond B., Agabriel J., Robelin J. et R. V 1987. Variations du contenu digestif et des réserves corporelles au cours du cycle gestation-lactation. *Bulletin technique C.R.Z.V. Theix* 70, 117-131.

Coleno F-C et Duru M 1998. Gestion de production en systèmes d'élevage utilisateurs d'herbe: une approche par atelier. *Etudes et Recherches INRA Département de Recherches sur les Systemes Agraires et le Developpement* 31, 45-61.

Coleno FC, Duru M et Soler LG 2002. A simulation model of a dairy forage system to evaluate feeding management strategies with spring rotational grazing. *Grass and Forage Science* 57, 312-321.

Combret LPd, Dobremez L, Havet A et Perret E 2009. Transformations des exploitations agricoles et evolutions possibles de la durabilite de l'elevage en vallee d'Abondance (Haute-Savoie) selon differents scenarios. In 16 emes Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants, pp. 333-336, Institut de l'Elevage, Paris.

Coquil X, Faverdin P et Garcia F 2005. Modélisation dynamique de la démographie d'un troupeau bovin laitier. In 12ème Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants Institut de l'Elevage, Paris.

Coquillard P et Hill DRC 1997. Modélisation et simulation d'écosystèmes - Des modèles déterministes aux simulations à événements discrets. Masson, 273 p.

Coulon JB et Remond B 1991. Variations in Milk Output and Milk Protein-Content in Response to the Level of Energy Supply to the Dairy-Cow - a Review. *Livestock Production Science* 29, 31-47.

Coulon JB et Rémond B 1991. Réponses de la production et de la composition du lait de vache aux variations d'apports nutritifs. *INRA Productions Animales* 4, 49-56.

Coulon JB, Delacroix-Buchet A, Martin B et Pirisi A 2005. Facteurs de production et qualité sensorielle des fromages. *INRA Productions Animales* 18(1), 49-62.

Cournut S (2001). Le fonctionnement des systèmes biologiques pilotés: simulation à événements dicrets d'un troupeau ovin conduit en troi agnelages en deux ans. Thèse de Doctorat en agronomie, Université Claude Bernard - Lyon I, Lyon, FRA, 491 p.

Cournut S, Léger L, Trommenschlager J et Fiorelli J 2005. Intérêt de l'analyse multi-tableaux pour caractériser les carrières animales. Illustration par les données du troupeau de vaches laitières de l'INRA de Mirecourt. In 12èmes Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants, p. 355, Institut de l'Elevage, Paris.

Cousinie P 2010. Produire autonome et economie sur les territoires: l'agriculture durable, une voie d'avenir. In Proceedings of a symposium on Innovation and Sustainable Development in Agriculture and Food, 28 June to 1st July 2010, p. 11, Montpellier, France.

Crepel G et Claisse V 2009. Concilier transition, rendement et valeur alimentaire [en ligne]. Réussir: Le syndicat agricole. Disponible sur: <http://www.syndicat-agricole.com/actualites/elevage-mise-a-l-herbe-concilier-transition-rendement-et-valeur-alimentaire&fldSearch=:3YQJKATV.html>. (Page consultée le 02/05/2012).

Cros M-J, Duru M, Garcia F, Grasset M, Legall A, Martin-Clouaire R, Peyre D, Delaby L, Fiorelli J-L et Peyraud J-L 2000. Evaluation d'un simulateur de stratégies de pâturage de vaches laitières. *3R* 7, 333-336.

Cros MJ, Garcia F, Martin Clouaire R et Rellier JP 2003. Modeling management operations in agricultural production simulators. *E-Journal - CIGR* 2, 1-11.

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

Curtis LE, Kallenbach RL et Roberts CA 2008. Allocating forage to fall-calving cow-calf pairs strip-grazing stockpiled tall fescue. *Journal of Animal Science* 86, 780-789.

Cutullic E (2010). Concurrence entre lactation et reproduction chez la vache laitière. Biologie Animale et Végétale. Thèse de Doctorat, Université de Caen Basse-Normandie, Caen, FRA, 170 p.

de Ruffray S 2004. Qu'est-ce qu'un système expert? [en ligne]. Hypergéométrie. Disponible sur: http://www.hypergeo.eu/IMG/article_PDF/article_84.pdf. (Page consultée le 26/01/2011).

de Vries MJ et Veerkamp RF 2000. Energy balance of dairy cattle in relation to milk production variables and fertility. *Journal of Dairy Science* 83, 62-69.

Dedieu B et Ingrand S 2010. Incertitude et adaptation : cadres théoriques et application à l'analyse de la dynamique des systèmes d'élevage *INRA Productions Animales* 23, 81-91.

Dedieu B, Chia E, Leclerc B, Moulin CH et Tichit M 2008. L'élevage en mouvement - Flexibilité et adaptation des exploitations herbivores. Editions Quae, Paris, 294 p.

Del Prado A, Misselbrook T, Chadwick D, Hopkins A, Dewhurst RJ, Davison P, Butler A, Schroder J et Scholefield D 2011. SIMS(DAIRY): A modelling framework to identify sustainable dairy farms in the UK. Framework description and test for organic systems and N fertiliser optimisation. *Science of the Total Environment* 409, 3993-4009.

Delaby L et Pomiès D 2004. Intérêt d'un apport de concentré ou de foin chez les vaches laitières au pâturage en zone de demi-montagne. In 11èmes Rencontres autour de la Recherche sur les Ruminants Institut de l'Elevage, Paris.

Delaby L et Peyraud JL 2009. Valoriser les fourrages de l'exploitation pour produire du lait. *Fourrages* 198, 191-210.

Delaby L, Peyraud J.L. et Faverdin P 2001. Pâture'IN: le pâturage des vaches laitières assistés par ordinateur. *Fourrages* 167, 385-398.

Delaby L, Peyraud JL et Delagarde R 2003. Is it necessary to supplement dairy cows at grazing ? *Productions Animales* 16, 183-195.

Delaby L, Faverdin P, Michel G, Disenhaus C et Peyraud JL 2009. Effect of different feeding strategies on lactation performance of Holstein and Normande dairy cows. *Animal* 3, 891-905.

Delagarde R et O'Donovan M 2005. Les modèles de prévision de l'ingestion journalière d'herbe et de la production laitière des vaches au pâturage. *INRA Productions Animales* 18, 241-253.

Delagarde R, Prache S, D'Hour P et Petit M 2001. Ingestion de l'herbe par les ruminants au pâturage. *Fourrages* 166, 189-212.

Delagarde R, Faverdin P, Baratte C et Peyraud J 2004. Prévoir l'ingestion d'herbe et la production des vaches laitières : GRAZEIN, un modèle pour raisonner l'alimentation au pâturage. In 11èmes Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants, pp. 295-298, Institut de l'Elevage, Paris.

Delagarde R, Faverdin P, Baratte C et Peyraud JL 2011a. Grazeln: a model of herbage intake and milk production for grazing dairy cows. 2. Prediction of intake under rotational and continuously stocked grazing management. *Grass and Forage Science* 66, 45-60.

Delagarde R, Valk H, Mayne CS, Rook AJ, González-Rodríguez A, Baratte C, Faverdin P et Peyraud JL 2011b. Grazeln: a model of herbage intake and milk production for grazing dairy cows. 3. Simulations and external validation of the model. *Grass and Forage Science* 66, 61-77.

Dierking RM, Kallenbach RL, Kerley MS, Roberts CA et Lock TR 2008. Yield and Nutritive Value of 'Spring Green' Festulolium and 'Jesup' Endophyte-Free Tall Fescue Stockpiled for Winter Pasture. *Crop Science* 48, 2463-2469.

Dillon P, Crosse S, Stakelum G et Flynn F 1995. The effect of calving date and stocking rate on the performance of spring-calving dairy cows. *Grass and Forage Science* 50, 286-299.

Disenhaus C, Grimard B, Trou G et Delaby L 2005. De la vache au système : s'adapter aux différents objectifs de reproduction en élevage laitier ? In 12 èmes Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants Institut de l'Elevage, Paris.

Dobremez L, Josien E., Camacho O. et Andrieu N. 2008. la sécurisation des systèmes fourragers et la réponse aux enjeux agri-environnementaux en montagne. In L'élevage en mouvement - flexibilité et adaptation des exploitations herbivores, pp. 241-257, Editions Quae.

Dulphy JP 1987. Fenaison: pertes en cours de récolte et de conservation. *Les Fourrages Secs: Récolte, Traitement, Utilisation*, ed. by Demarquilly C. INRA, Paris, 103-124.

Dumont B, Meuret M, Boissy A et Petit M 2001. Le pâturage vu par l'animal : mécanismes comportementaux et applications en élevage. *Fourrages*, 213-238.

Duru M, Fiorelli JL et Osty PL 1988a. Proposition pour le choix et la maîtrise du système fourrager. I Notion de trésorerie fourragère. *Fourrages*, 37-56.

Duru M, Nocquet J et Bourgeois A 1988b. Le système fourrager: un concept opératoire? *Fourrages* 115, 251-272.

Duru M, Cruz P et Magda D 2008. La conduite des couverts prairiaux, source de flexibilité. In L'élevage en mouvement - flexibilité et adaptation des exploitations herbivores, pp. 23-36, Editions Quae, Paris.

Espinasse R, Le Lan B et Deparcy L 1997. Conséquences économiques de différents intervalles entre vêlages chez la vache laitière. In 4èmes Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants, p. 159, Institut de l'Élevage, Paris.

Ezanno P (2002). Modélisation de la relation entre l'état des réserves corporelles et la productivité des troupeaux bovins - cas des bovins N'Dama en milieu agro-pastoral extensif de zone tropicale humide (Kolda, Sénégal). Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Montpellier. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Montpellier, Montpellier, 54 p.

Faidherbe L, Hasnaoui N, Deborde I, Morineau J et Lusson J-M 2007. Pistes d'adaptations à la sécheresse des systèmes d'élevage bovin économes basés sur le pâturage. *Fourrages* 191, 297-310.

FAO 2009. La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture – le point sur l'élevage. FAO, Rome, 186 p.

Farina SR, Garcia SC, Fulkerson WJ et Barchia IM 2011. Pasture-based dairy farm systems increasing milk production through stocking rate or milk yield per cow: pasture and animal responses. *Grass and Forage Science* 66, 316-332.

Farruggia A, Dumont B, Loiseau P, Baumont R et 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.

Farruggia A, Pomies D, Bethier D, Troquier O, Le Bec G, Paccard P, Baumont B et Pradel P 2010. Balance between production and biodiversity in two upland dairy grazing systems. In 23. General Meeting of the European Grassland Federation (eds. H Schnyder, J Isselstein, F Taube, K Auerswald, J Schellberg, M Wachendorf, A Herrmann, M Gierus, N Wrage et A Hopkins), pp. 940-942, European Grassland Federation and Arbeitsgemeinschaft Grünland und Futterbau der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften, Kiel (DEU).

Farruggia A, Parguel P, Hulin S, Reuillon J-L, Pomiès D, Baumont B, Risoud G, Hauwuy A, Veysset P et Martin B 2009. Les conditions de production laitière dans les cahiers des charges des filières fromagères sous signe AOC et leurs conséquences dans les

exploitations d'élevage des zones d'appellation. In Journées de l'AFPF du printemps, AFPF, Paris.

Faure M 1999. Un produit agricole "affiné" en objet culturel - Le fromage de beaufort dans les Alpes du Nord. *Terrain* 33, 81-92.

Faverdin P, Delaby L et Delagarde R 2007a. L'ingestion d'aliments par les vaches laitières et sa prévision au cours de la lactation. *INRA Productions Animales* 20, 151-162.

Faverdin P, Delagarde R., Delaby L. et Meschy F. 2007b. Alimentation des vaches laitières. In Alimentation des bovins, ovins et caprins - Besoins des animaux - Valeur des aliments - tables INRA 2007, p. 307, Editions Quae.

Faverdin P, Baratte C, Delagarde R et Peyraud JL 2011. GrazIn: a model of herbage intake and milk production for grazing dairy cows. 1. Prediction of intake capacity, voluntary intake and milk production during lactation. *Grass and Forage Science* 66, 29-44.

Fiorelli JL, Coquil X, Trommenschlager JM, Bazard C et Blouet A 2010. Des prairies permanentes, unique ressource d'un système laitier biologique en Lorraine. In 17. Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants, pp. 45-48, Institut de l'Elevage, Paris (FRA).

Flaten O et Lien G 2009. Organic dairy farming in Norway under the 100% organically produced feed requirement. *Livestock Science* 126, 28-37.

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

Folke C 2006. Resilience: The emergence of a perspective for social-ecological systems analyses. *Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions* 16, 253-267.

Friggens NC et Badsberg JH 2007. The effect of breed and parity on curves of body condition during lactation estimated using a non-linear function. *Animal* 1, 565-574.

Friggens NC et Newbold JR 2007. Towards a biological basis for predicting nutrient partitioning: the dairy cow as an example. *Animal* 1, 87-97.

Garcia-Launay F, Sibra C, Molénat H, Agabriel C et Brunschwig G 2011. Grassland use in mountain bovine systems according to a hierarchy of geographical determinants. *The Journal of Agricultural Science FirstView*, 1-15.

Garcia-Martinez A, Bernuès A et Olaizola AM 2011. Simulation of mountain cattle farming system changes under diverse agricultural policies and off-farm labour scenarios. *Livestock Science* 137, 73-86.

García-Martínez A, Olaizola A et Bernués A 2009. Trajectories of evolution and drivers of change in European mountain cattle farming systems. *Animal* 3, 152-165.

Gauch HG, Hwang JTG et Fick GW 2003. Model evaluation by comparison of model-based predictions and measured values. *Agronomy Journal* 95, 1442-1446.

Gibon A, Sibbald AR et Thomas C 1999a. Improved sustainability in livestock systems, a challenge for animal production science - Introduction. *Livestock Production Science* 61, 107-110.

Gibon A, Sibbald AR, Flamant JC, Lhoste P, Revilla R, Rubino R et Sørensen JT 1999b. Livestock farming systems research in Europe and its potential contribution for managing towards sustainability in livestock farming. *Livestock Production Science* 61, 121-137.

Girard N (1995). Modéliser une représentation d'experts dans le champ de la gestion de l'exploitation agricole. Stratégies d'alimentation au pâturage des troupeaux ovins allaitants en région méditerranéenne. systèmes intégrés en biologie, agronomie, géosciences, hydrosociences, environnement. Thèse de Doctorat, Université de Lyon I, Lyon, FRA, 234 p.

Girard N et Hubert B 1999. Modelling expert knowledge with knowledge-based systems to design decision aids - The example of a knowledge-based model on grazing management. *Agricultural Systems* 59, 123-144.

Gouttenoire L, Cournut S et Ingrand S 2011. Modelling as a tool to redesign livestock farming systems: a literature review. *Animal* 5, 1957-1971.

Gross J, van Dorland HA, Bruckmaier RM et Schwarz FJ 2011. Performance and metabolic profile of dairy cows during a lactational and deliberately induced negative energy balance with subsequent realimentation. *Journal of Dairy Science* 94, 1820-1830.

Grossman M et Koops WJ 2003. Modeling extended lactation curves of dairy cattle: A biological basis for the multiphasic approach. *Journal of Dairy Science* 86, 988-998.

Groult Y 2010. Un accord avec l'Amérique latine détruirait notre élevage [en ligne]. Le web de la terre. Disponible sur: http://www.laterre.fr/article.php3?id_article=718. (Page consultée le 04/05/2012).

Gruber L, Steinwider A, Stefanon B, Steiner B et Steinwender R 1999. Influence of grassland management in Alpine regions and concentrate level on N excretion and milk yield of dairy cows. *Livestock Production Science* 61, 155-170.

Guerin G et Agreil C 2007. Qualifier les surfaces pastorales pour combiner le renouvellement des ressources alimentaires et la maîtrise des couverts végétaux. Acquis, enjeux et questions actuelles In 14 emes Recontres autour des Recherches sur les Ruminants, pp. 145-152, Institut de l'Elevage, Paris.

Guerin G, Leger F., Pflimlin A., 1994. Stratégie d'alimentation - Méthodologie d'analyse et de diagnostic de l'utilisation et de la gestion des surfaces fourragères et pastorales.

Gueringer A, Orth D, Caron A, Balay C et Landre F 2010. AOC fromagères et biodiversité: deux exemples en Auvergne pour une étude des relations entre cahiers des charges, systèmes fourragers et biodiversité prairiale. In Des producteurs aux consommateurs: les reconfigurations récentes des filières laitières en France et en Europe - Colloque International les 7 et 8 Octobre 2010, p. 18, CERAMAC, Clermont-Ferrand.

- Gueringer A, Rapey H, Houdart M, Bigot G, Josien E et Landre F 2009. Adaptability through spatial management A case study of livestock farms in the Massif Central, France. *Outlook on Agriculture* 38, 111-118.
- Hardy A, Le Bris X et Pelletier P 2001. Herb'ITCF® : une méthode d'aide à la gestion du pâturage. *Fourrages* 167, 399-415.
- Havet A, Martin P, Laurent M et Lelaure B 2010. Adaptation of dairy farms to the climatic uncertainties and to the new regulations. Example of the cow and the goat dairy productions in the 'Plaine de Niort'. *Fourrages*, 145-151.
- Hémidy L, Maxime F et Soler L-G 1993. Instrumentation et pilotage stratégique dans l'entreprise agricole. In Instrumentation de gestion et conduite de l'entreprise, pp. 91-118, Institut national de la recherche agronomique, Ivry.
- Hernandez-Urdaneta A, Coppock CE, McDowell RE, Gianola D et Smith NE 1976. Changes in Forage-Concentrate Ratio of Complete Feeds for Dairy Cows. *Journal of Dairy Science* 59, 695-707.
- Herrero M, Fawcett RH et Dent JB 1999. Bio-economic evaluation of dairy farm management scenarios using integrated simulation and multiple-criteria models. *Agricultural Systems* 62, 169-188.
- Hervieu B et Viard J 2001. Au bonheur des campagnes. Editions de l'Aube, 154 p.
- Hirooka H 2010. Systems approaches to beef cattle production systems using modeling and simulation. *Animal Science Journal* 81, 411-424.
- Hoden A, Muller A, Peyraud JL, Delaby L et Faverdin P 1991a. Pâturage pour les vaches laitières. Effets du chargement et de la complémentation en pâturage tournant simplifié. *INRA Productions Animales* 4, 229-239.
- Hoden A, Peyraud JL, Muller A, Delaby L et Faverdin P 1991b. Simplified Rotational Grazing Management of Dairy-Cows - Effects of Rates of Stocking and Concentrate. *Journal of Agricultural Science* 116, 417-428.
- Hoffmann I 2011. Livestock biodiversity and sustainability. *Livestock Science* 139, 69-79.
- Horan B, Dillon P, Faverdin P, Delaby L, Buckley F et Rath M 2005. The interaction of strain of Holstein-Friesian cows and pasture-based feed systems on milk yield, body weight, and body condition score. *Journal of Dairy Science* 88, 1231-1243.
- Huyghe C 2009. La multifonctionnalité des prairies en France. II. Conciliation des fonctions de production et de préservation de l'environnement. *Cahiers Agricultures* 18.
- INRA 2009. Atelier de prospective - Rapport ADAGE - ADaptation de l'AGriculture et des Ecosystèmes anthropisés au changement climatique. INRA ANR, 76 p.
- IPCC 2007. IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007. Contribution du Groupe de travail I, II, III au quatrième Rapport d'évaluation du GIEC, Geneva, 114 p.

Jacquot AL (2008). Etude des voies d'adaptation des exploitations laitières pour réduire leur dépendance aux énergies fossiles et leurs émissions de gaz à effet de serre Animal Sciences. Master - Engineer degree, AgroParisTech, Paris, 83 p.

Jacquot AL, Blanc F, Lacour C, Baumont R, Brunschwig G et Agabriel C 2010. Relations entre période de vêlages et conduite des surfaces fourragères : étude dans des élevages laitiers herbagers du Puy-de-Dôme. In 17èmes Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants, p. 61, Institut de l'Elevage, Paris

Jeanneaux P, Meyer D et Barjolle D 2011. Gouvernance des filières fromagères sous AOP et origine des prix de lait: un cadre d'analyse. In 5èmes Journées de Recherches en Sciences Sociales des 08 et 09 Décembre 2011 p. 19, Société Française d'Economie Rurale, Dijon.

Jeuffroy MH, Bergez JE, David C, Flénet F, Gate P, Loyce C, Maupas F, Meynard JM, Reau R et Surleau C 2008. Utilisation des modèles pour l'aide à la conception et à l'évaluation d'innovations techniques en production végétale : bilan et perspectives. In Systèmes de culture innovants et durables : Quelles méthodes pour les mettre au point et les évaluer ? , pp. 109-128, Educagri Editions, Dijon (FRA).

Jouven M (2006). Quels équilibres entre production animale et utilisation durable des prairies dans les systèmes bovins allaitants herbagers? Une approche par modélisation des interactions conduite-troupeau-ressources. Agronomie. Thèse de Doctorat, INAP-G, Ecole Doctorale Abies, Paris, 250 p.

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

Jouven M, Carrere P et Baumont R 2006b. Model predicting dynamics of biomass, structure and digestibility of herbage in managed permanent pastures. 2. Model evaluation. *Grass and Forage Science* 61, 125-133.

Jouven M, Agabriel J et 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, Loiseau P, Farruggia A, Orth D et Baumont R 2007. Estimer la diversité floristique des prairies des exploitations herbagères avec un modèle de simulation couplé à un indicateur 'Note de biodiversité'. *Fourrages* 191, 359-376.

Jussiau R, Montméas, L., Parot, J.-L. 1999. L'élevage en France, 10 000 ans d'histoire. Educagri, 539 p.

Keating BA et McCown RL 2001. Advances in farming systems analysis and intervention. *Agricultural Systems* 70, 555-579.

Kristensen T et Kristensen ES 1998. Analysis and simulation modelling of the production in Danish organic and conventional dairy herds. *Livestock Production Science* 54, 55-65.

Kristensen T, Sorensen JT et Clausen S 1997. Simulated effect on dairy cow and herd production of different grazing intensities. *Agricultural Systems* 55, 123-138.

Lacey L et Theau JP 2008. Analyse d'un système basé sur le pâturage tournant: l'importance des décisions en début de printemps. In Symposium international INRA-UMR AGIR (Agrosystèmes et développement territorial) : Outils pour la gestion des prairies permanentes, pp. 229-239, Castanet-Tolosan (FRA).

Lacombe P 2002. L'agriculture à la recherche de ses futurs DATAR Groupe de prospective - Agriculture et territoires, Paris, 184 p.

Laisney C 2011. L'évolution de l'alimentation en France. Panorama des tendances lourdes. *Futuribles*, 5-20.

Landais E 1998. Agriculture durable : les fondements d'un nouveau contrat social ? *Courrier de l'Environnement de l'INRA*, 5-22.

Landais E 1999. Agriculture durable et plurifonctionnalité de l'agriculture. *Fourrages*, 317-331.

Landais E et Balent G 1993. Pratiques d'élevage extensif: identifier, modéliser, évaluer. INRA, 380 p.

Laurent C, Maxime F, Tichit M et Mazé A 2003. Multifonctionnalité de l'agriculture et modèles de l'exploitation agricole. *Economie Rurale* 273, 134-152.

Le Cozler Y, Lollivier V, Lacasse P et Disenhaus C 2008. Rearing strategy and optimizing first-calving targets in dairy heifers: a review. *Animal* 2, 1393-1404.

Le Cozler Y, Pecatte J-R, Porhiel J-Y, Brunshwig P et Disenhaus C 2009. Pratiques d'élevages et performances des génisses laitières : état des connaissances et perspectives. *INRA Productions Animales* 22, 303-316.

Le Gal PY (2012). De l'analyse des pratiques gestionnaires à l'aide à la conception de systèmes de production agricole - contribution à une agronomie de l'exploitation agricole et des territoires. systèmes intégrés en biologie, agronomie, géosciences, hydrosciences, environnement. Rapport d'HDR, Université de Montpellier, Montpellier, 77 p.

Le Gal PY, Dugue P, Faure G et Novak S 2011. How does research address the design of innovative agricultural production systems at the farm level? A review. *Agricultural Systems* 104, 714-728.

Le Gal PY, Merot A, Moulin CH, Navarrete M et Wery J 2009. A modelling framework to support farmers in designing agricultural production systems. *Environmental Modelling & Software* 25, 258-268.

Le Gal PY, Merot A, Moulin CH, Navarrete M et Wery J 2010. A modelling framework to support farmers in designing agricultural production systems. *Environmental Modelling & Software* 25, 258-268.

Le Moigne J-L 1977. La théorie du système général : théorie de la modélisation (ed. 1994). Presses Universitaires de France - PUF, Paris, 352 p.

Leesburg VLR, Tess MW et Griffith D 2007. Evaluation of calving seasons and marketing strategies in Northern Great Plains beef enterprises: I. Cow-calf systems. *Journal of Animal Science* 85, 2314-2321.

Léger F, Bellon S et Guérin G 2000. Outils et méthodes pour analyser les ressources au pâturage. In Rupture : nouveaux enjeux, nouvelles fonctions, nouvelle image de l'élevage sur parcours, , pp. 205-215, CIHEAM - Options Méditerranéennes.

Legifrance 1985. Loi n° 85-30 du 9 janvier 1985 relative au développement et à la protection de la montagne [en ligne]. Disponible sur: <http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000317293&categorieLien=cid>. (Page consultée le 04/01/2012).

Lemaire G et Pflimlin A 2007. Les sécheresses passées et à venir : quels impacts et quelles adaptations pour les systèmes fourragers ? *Fourrages*, 163-180.

Lerbet G 1984. Approche systémique et production du savoir. L'Harmattan, 277 p.

Lossouarn J 2003. Stratégies dans les filières animales. *Productions Animales* 16, 317-324.

Macdonald KA, Penno JW, Lancaster JAS et Roche JR 2008. Effect of stocking rate on pasture production, milk production, and reproduction of dairy cows in pasture-based systems. *Journal of Dairy Science* 91, 2151-2163.

Makowski D, Hendrix EMT, van Ittersum MK et Rossing WAH 2000. A framework to study nearly optimal solutions of linear programming models developed for agricultural land use exploration. *Ecological Modelling* 131, 65-77.

Martin B, Hurtaud C, Graulet B, Ferlay A, Chilliard Y et Coulon J-B 2009. Herbe et qualités nutritionnelles et sensorielles des produits laitiers. In Journées de l'AFPF, AFPF, Paris.

Martin G (2009). Analyse et conception de systèmes fourragers flexibles par modélisation systémique et simulation dynamique. Agronomie. Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, Toulouse, 183 p.

Martin G, Martin-Clouaire R, Rellier JP et Duru M 2011. A simulation framework for the design of grassland-based beef-cattle farms. *Environmental Modelling & Software* 26, 371-385.

Martin O et Sauvant D 2010a. A teleonomic model describing performance (body, milk and intake) during growth and over repeated reproductive cycles throughout the lifespan of dairy cattle. 1. Trajectories of life function priorities and genetic scaling. *Animal* 4, 2030-2047.

Martin O et Sauvant D 2010b. A teleonomic model describing performance (body, milk and intake) during growth and over repeated reproductive cycles throughout the lifespan of dairy cattle. 2. Voluntary intake and energy partitioning. *Animal* 4, 2048-2056.

Mathieu J et Raphalen J-L 1981. Variabilité climatique et systèmes fourragers. *Perspectives agricoles* 53, 45-54.

Matthews KB, Wright IA, Buchan K, Davies DA et Schwarz G 2006. Assessing the options for upland livestock systems under CAP reform: Developing and applying a livestock systems model within whole-farm systems analysis. *Agricultural Systems* 90, 32-61.

McCall DG et Clark DA 1999. Optimized dairy grazing systems in the Northeast United States and New Zealand. II. System analysis. *Journal of Dairy Science* 82, 1808-1816.

McCarthy B, Delaby L, Pierce KM, Journot F et Horan B 2011. Meta-analysis of the impact of stocking rate on the productivity of pasture-based milk production systems. *Animal* 5, 784-794.

McCown RL, Carberry PS, Dalgliesh NP, Foale MA et Hochman Z 2012. Farmers use intuition to reinvent analytic decision support for managing seasonal climatic variability. *Agricultural Systems* 106, 33-45.

McEvoy M, Delaby L, Kennedy E, Boland TM et O'Donovan M 2009. Early lactation dairy cows: Development of equations to predict intake and milk performance at grazing. *Livestock Science* 122, 214-221.

McEvoy M, Kennedy E, Murphy JP, Boland TM, Delaby L et O'Donovan M 2008. The Effect of Herbage Allowance and Concentrate Supplementation on Milk Production Performance and Dry Matter Intake of Spring-Calving Dairy Cows in Early Lactation. *Journal of Dairy Science* 91, 1258-1269.

Menadier L 2010. Pratiques agricoles et paysages en zones d'AOC fromagère de moyennes montagnes en France: entre matérialité et symbolique, entre modernité et tradition. In Des producteurs aux consommateurs: les reconfigurations récentes des filières laitières en France et en Europe - Colloque International les 7 et 8 Octobre 2010, p. 22, CERAMAC, Clermont-Ferrand.

Météofrance Bilans climatiques [en ligne]. Disponible sur: http://climat.meteofrance.com/chgt_climat2/bilans_climatiques. (Page consultée le 09/02/2012).

Mogensen L (2004). Organic milk production based entirely on home-grown feed. Agricultural science. Thèse de Doctorat, Danish Institute of Agricultural Sciences, The Royal Veterinary and Agricultural University, Tjele, 72 p.

Moisan H 1977. Développement agricole: Reflexions critiques sur: " L'exploitation vue comme un système ". *Economie Rurale*, 60-60.

Mollenhorst H (2005). How to house a hen : assessing sustainable development of egg production systems. Animal Production Systems. Thèse de Doctorat, Wageningen Universiteit, Wageningen, NL, 136 p.

Montagne ANdEd 2005. Dossier: Le classement en Montagne [en ligne]. Pour La Montagne 147: 12. Disponible. (Page consultée le.

Moreau J-C, Delaby L., Duru M., Guérin G., 2009. Démarches et outils de conseil autour du système fourrager: évolutions et concepts. *Fourrages* 200, 565-586.

Moreau JC et Lorgeou J 2007. Premiers éléments de prospective sur les conséquences des changements climatiques: impacts sur les prairies, le maïs et les systèmes fourragers. *Fourrages* 191, 285-295.

Moseley JE, Coppock CE et Lake GB 1976. Abrupt Changes in Forage-Concentrate Ratios of Complete Feeds Fed Ad Libitum to Dairy Cows. *Journal of Dairy Science* 59, 1471-1483.

Mosnier C (2009). Adaptation des élevages de bovins allaitants aux aléas de prix et de climat : approches par modélisation. Economie et zootechnie. Thèse de Doctorat, Institut National Agronomique Paris-Grignon, Paris, FRA, 287 p.

Moulin C 2002. Une méthode pour comprendre les pratiques d'alimentation des herbivores domestiques - Analyse du fonctionnement des systèmes d'alimentation par enquêtes en élevages.

Moulin C, Girard N et Dedieu B 2001. L'apport de l'analyse fonctionnelle des systèmes d'alimentation. *Fourrages* 167, 337-368.

Moulin CH, Forel E et Lelièvre F 2009. Autonomie et robustesse des systèmes d'élevage en zone périméditerranéenne face aux évolutions de la variabilité climatique. In 16èmes Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants, p. 377, Institut de l'Elevage, Paris (FRA).

Moulin CH, Blanc F, Ezanno P et Bocquier F 2004. Modelling as a tool for the teaching of livestock dynamics. *Animal Research* 53, 439-450.

Muller-Lindenlauf M, Deittert C et Kopke U 2010. Assessment of environmental effects, animal welfare and milk quality among organic dairy farms. *Livestock Science* 128, 140-148.

Muller P-A 1999. Modélisation objet avec UML. Eyrolles, Paris, 421 p.

Nettier B, Dobremez L, Coussy JL et Romagny T 2010a. Attitudes of livestock farmers and sensitivity of livestock farming systems to drought conditions in the French Alps. *Revue De Géographie Alpine-Journal of Alpine Research* 98, 383-400.

Nettier B, Dobremez L, Orsini M et Fleury P 2010b. Practices and motivations of farmers who sign contracts to preserve grassland biodiversity. In Grassland in a changing world. Proceedings of the 23rd General Meeting of the European Grassland Federation, Kiel, Germany, 29th August - 2nd September 2010, pp. 714-716.

Orth D, Gueringer A, Balay C et Landre F 2009. Links between forage systems, practices and biodiversity: an approach in a PDO cheese area in French mountains. In 15th Meeting of the FAO-CIHEAM Mountain Pastures Network -Integrated research for the sustainability of mountain pastures - October, 7-9, 2009, FAO-CIHEAM, Les Diablerets, Switzerland

Osgathorpe LM, Park K, Goulson D, Acs S et Hanley N 2011. The trade-off between agriculture and biodiversity in marginal areas: Can crofting and bumblebee conservation be reconciled? *Ecological Economics* 70, 1162-1169.

Osty PL 1977. Développement agricole: Conditions du choix des systèmes et techniques de production par les agriculteurs: l'exploitation vue comme un système. *Economie Rurale*, 61-61.

Paccard P, Capitan M et Farruggia A 2003. Autonome alimentaire des élevages bovins laitiers. In 10^{èmes} Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants, , pp. 89-92, Institut de l'Elevage, Paris.

Papy F 1994. Savoir pratique sur les systèmes techniques et aide à la décision. *Prise de décision et aide à la décision en agriculture: présentation d'une démarche*, CIRAD-INRA. Montpellier. *Francia* 2, 1-2.

Paradis S et Sarrazin F 2010. Approche comparative des dynamiques régionales et locales de zones à faible densité de production laitière. In Des producteurs aux consommateurs: les reconfigurations récentes des filières laitières en France et en Europe - Colloque International les 7 et 8 Octobre 2010, p. 12, CERAMAC, Clermont-Ferrand.

Parr JR, Papendick RI, Hornick SB et Meyer RE 1990. Sustainable agriculture in the United States. In Sustainable agricultural systems, Soil and Water conservation Society, pp. 50-67, Ankeny, Iowa.

Pavie J et Retif R 2006. Facteurs de variation des performances technico-économiques des exploitations d'élevage bovin en agriculture. In 13^{èmes} Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants, , pp. 373-376, Institut de l'Elevage, Paris.

Peck SL 2004. Simulation as experiment: a philosophical reassessment for biological modeling. *Trends in Ecology & Evolution* 19, 530-534.

Perrot C, Béguin E, Morhain B et Tchakérian E 2005. L'élevage dans les exploitations françaises - Etat des lieux et perspectives. *Economie Rurale* 288, 25-39.

Peyraud JL et Delaby L 2005. Combiner la gestion optimale du pâturage et les performances des vaches laitières : enjeux et outils. *INRA Productions Animales* 18, 231-240.

Pflimlin A 2008. Evolution de l'Europe laitière et des systèmes fourragers. Argumentaire pour une autre politique *Fourrages* n°196, p401 - 424.

Poetsch EM 2007. Low inputs farming systems and livestock production – Grassland and dairy farming in Austria In Low inputs Farming Systems: an opportunity to develop sustainable agriculture, Proceedings of the JRC Summer University, 2-5 July 2007 p. 127, JRC European Commission - Office for Official Publications of the European Communities, Ranco (ITA).

Poitrineau A 1984. Le lait et la production fromagère dans les montagnes d'Auvergne au XVIII^{ème} siècle In L'élevage et la vie pastorale dans les montagnes de l'Europe au moyen âge et à l'époque moderne. Colloque international, p. 438, Presses universitaires Blaise Pascal - Institut d'études du Massif central, Clermont-Ferrand.

Pomies D, Baumont R, Egal D et Rémond B 2008. L'utilisation d'ensilage d'herbe et de foin de haute qualité chez des vaches en monotraite permet de supprimer le concentré

avec une perte de lait limitée. In 15èmes Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants, p. 179, Institut de l'Elevage, Paris (FRA).

Pomiès D, Caré S et Veissier I 2010. Monotraitée combinée à l'allaitement chez les vaches Prim'Holstein. In 17èmes Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants, pp. 233-236, Institut de l'Elevage, Paris

Pottier E, Tournadre H, Benoit M et Prache S 2009. Maximiser la part du pâturage dans l'alimentation des ovins: intérêt pour l'autonomie alimentaire, l'environnement et la qualité des produits. *Fourrages* 199, 349-371.

Puillet L (2010). Modéliser la variabilité biologique en réponse aux pratiques de conduite - application au troupeau caprin. Agronomie. Thèse de Doctorat, AgroParisTech, Paris, 254 p.

Puillet L, Sauvant D et Tichit M 2010a. Intérêts et limites de la prise en compte de la variabilité individuelle dans les modèles de fonctionnement du troupeau. *INRA Productions Animales* 23, 255-268.

Puillet L, Martin O, Sauvant D et Tichit M 2010b. An individual-based model simulating goat response variability and long-term herd performance. *Animal FirstView*, 1-15.

Ragot M 2001. Conversion à l'agriculture biologique: le cas de la production laitière. Educagri, 355 p.

Reist M, Erdin D, von Euw D, Tschuemperlin K, Leuenberger H, Chilliard Y, Hammon HM, Morel C, Philipona C, Zbinden Y, Kuenzi N et Blum JW 2002. Estimation of Energy Balance at the Individual and Herd Level Using Blood and Milk Traits in High-Yielding Dairy Cows. *Journal of Dairy Science* 85, 3314-3327.

Remppis S, Steingass H, Gruber L et Schenkel H 2011. Effects of Energy Intake on Performance, Mobilization and Retention of Body Tissue, and Metabolic Parameters in Dairy Cows with Special Regard to Effects of Pre-partum Nutrition on Lactation - A Review. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences* 24, 540-572.

Reuillon JL 2008. Références systèmes Bovins Lait des réseaux d'élevage d'Auvergne et Lozère. Les Réseaux d'élevage, Institut de l'Elevage, Clermont-Fd,

Reuillon JL 2011. Référentiel 2011 des réseaux d'élevage Auvergne, Lozère, Aveyron - Conjoncture 2010. Les Réseaux de l'élevage - Institut de l'Elevage, Clermont-Ferrand, 89 p.

Révillon S, Mosimann E, Farruggia A, Martin B, Python P et Meisser M 2008. La pâture, un argument pour la valorisation des produits de montagne sur les marchés de consommation. *Fourrages* 196, 461-472.

Rigolot C (2009). Modélisation de l'impact environnemental des pratiques en élevage porcin à l'échelle sectorielle (animal et effluent), de l'exploitation, et du cycle de vie (ACV). Incidence du niveau d'approche sur la perception des pratiques. Biologie et Agronomie. Thèse de Doctorat, Agrocampus Ouest, Rennes, FRA, 184 p.

Roche JR, Friggens NC, Kay JK, Fisher MW, Stafford KJ et Berry DP 2009. Invited review: Body condition score and its association with dairy cow productivity, health, and welfare. *Journal of Dairy Science* 92, 5769-5801.

Rossing WAH, Meynard JM et vanIttersum MK 1997. Model-based explorations to support development of sustainable farming systems: case studies from France and the Netherlands. *European Journal of Agronomy* 7, 271-283.

Rotz CA, Buckmaster DR et Comerford JW 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 CA, Mertens DR, Buckmaster DR, Allen MS et Harrison JH 1999. A Dairy Herd Model for Use in Whole Farm Simulations. *Journal of Dairy Science* 82, 2826-2840.

Rubin B, Sabatte N, Bousquet D, Brunschwig P, Perrot C, Gaillard B et Mulliez P 2004. Autonomie alimentaire dans les élevages laitiers des Pays de la Loire: les solutions par territoire et l'intérêt de la filière. In 11 emes Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants, Paris, pp. 163-166.

Rykiel EJJ 1996. Testing ecological models: the meaning of validation. *Ecological Modelling* 90, 229-244.

Sauvant D 1992. Systemic Modeling in Nutrition. *Reproduction Nutrition Development* 32, 217-230.

Sauvant D 2007. Cours de modélisation systémique - première partie les bases. In AgroParisTech, Paris.

Sauvant D et Martin O 2010. Robustesse, rusticité, flexibilité, plasticité... les nouveaux critères de qualité des animaux et des systèmes d'élevage: définitions systémique et biologique des différents concepts *INRA Productions Animales* 23, 5-10.

Scaglia G, Swecker WS, Fontenot JP, Fiske D, Fike JH, Abaye AO, Clapham W et Hall JB 2008. Forage systems for cow-calf production in the Appalachian region. *Journal of Animal Science* 86, 2032-2042.

Schils RLM, de Haan MHA, Hemmer JGA, van den Pol-van Dasselaar A, De Boer JA, Evers AG, Holshof G, van Middelkoop JC et Zom RLG 2007. DairyWise, a whole-farm dairy model. *Journal of Dairy Science* 90, 5334-5346.

Sérès C 2010. changement climatique et agriculture d'élevage en zone de montagne: premiers éléments de réflexion. *Courrier de l'Environnement de l'INRA* 58, 21-36.

Sigaud O 2007. Cours - Introduction à la modélisation orientée objets avec UML [en ligne]. Disponible sur: <http://www.dfr.ensta.fr/Cours/docs/IN204/uml.pdf>. (Page consultée le 01/02/2012).

Smith MD 2011a. The ecological role of climate extremes: current understanding and future prospects. *Journal of Ecology* 99, 651-655.

Smith MD 2011b. An ecological perspective on extreme climatic events: a synthetic definition and framework to guide future research. *Journal of Ecology* 99, 656-663.

Sørensen JT, Kristensen ES et Thyssen I 1992. A stochastic model simulating the dairy herd on a PC. *Agricultural Systems* 39, 177-200.

Soussana JF, Tallec T et Blanfort V 2010. Mitigating the greenhouse gas balance of ruminant production systems through carbon sequestration in grasslands. *Animal* 4, 334-350.

Spedding 1988. General aspect of modelling and its application in livestock production. In *Modelling of Livestock Production Systems*, pp. 3-13, Luwer AC Pub, EEC, London.

Steinwidder A, Starz W, Podstatzky L, Kirner L, Potsch EM, Pfister R et Gallnbock M 2010. Changing towards a seasonal low-input pastoral dairy production system in mountainous regions of Austria - results from pilot farms during reorganisation. In *Grassland in a changing world. Proceedings of the 23rd General Meeting of the European Grassland Federation, Kiel, Germany, 29th August - 2nd September 2010*, pp. 1012-1014.

Steinwidder A, Starz W, Podstatzky L, Gasteiner J, Pfister R, Rohrer H et Gallnbock M 2011. Milk production from grazed pasture in mountainous regions of Austria - impact of calving season. In *Grassland farming and land management systems in mountainous regions. Proceedings of the 16th Symposium of the European Grassland Federation, Gumpenstein, Austria, 29th-31st August, 2011*, pp. 329-331.

Streifeneder T, Tappeiner U, Ruffini FV, Tappeiner G et Hoffmann C 2007. Eclairage sur les transformations des structures agricoles dans les Alpes. Comparaison des indicateurs agro-structurels harmonisés à l'échelle locale. *Revue de Géographie Alpine*, 27-40.

Tedeschi LO 2006. Assessment of the adequacy of mathematical models. *Agricultural Systems* 89, 225-247.

Tedeschi LO, Fox DG, Chase LE et Wang SJ 2000. Whole-herd optimization with the Cornell Net Carbohydrate and Protein System. I. Predicting feed biological values for diet optimization with linear programming. *Journal of Dairy Science* 83, 2139-2148.

Tedeschi LO, Fox DG, Sainz RD, Barioni LG, Medeiros SrRd et Boin C 2005. Mathematical models in ruminant nutrition. *Scientia Agricola* 62, 76-91.

ten Napel J, van der Veen AA, Oosting SJ et Koerkamp PWGG 2011. A conceptual approach to design livestock production systems for robustness to enhance sustainability. *Livestock Science* 139, 150-160.

Thenard V, Theau J-P, Therond O et Duru M 2007. Représenter le système d'alimentation d'élevages laitiers pour comprendre leur stratégie d'adaptation au cahier des charges d'une IGP. *Productions Animales* 20 (5), 409-420.

Thompson PB et Nardone A 1999. Sustainable livestock production: methodological and ethical challenges. *Livestock Production Science* 61, 111-119.

Tittonell P, van Wijk MT, Herrero M, Rufino MC, de Ridder N et Giller KE 2009. Beyond resource constraints - Exploring the biophysical feasibility of options for the intensification of smallholder crop-livestock systems in Vihiga district, Kenya. *Agricultural Systems* 101, 1-19.

Tristant D, Lapierre O et Pressenda F 2004. Modèle d'optimisation de l'assolement et des rations dans une ferme de polyculture élevage laitier - Exemple de l'influence de la réforme de la PAC du juin 2003 sur l'assolement de la ferme de Grignon. In 11èmes Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants, p. 245, Institut de l'Elevage, Paris (FRA).

Tristant D, Lapierre O et Pressenda F 2006. Intérêt de l'approche globale pour l'évaluation de la performance économique des exploitations de polyculture élevage. Illustration en utilisant le modèle PerfAgro. In 13èmes Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants, p. 380, Institut de l'Elevage, Paris

Trocon JL, Coulon J.B., Lescourret F., 1994. Carrière des vaches laitières : Caractérisation de la phase d'élevage et relation avec les performances en première lactation. *INRA Productions Animales* 7, 359-368.

Vayssières J, Lecomte P et Gousseff M 2008. Modéliser les flux à l'échelle de l'exploitation pour accompagner les éleveurs dans la gestion de leurs prairies. *Les cahiers d'Orphée*, 6-8.

Vayssières J, Guerrin F, Paillat J-M et 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.

Veysset P 2010. Note méthodologique - Calcul de l'autonomie alimentaire à l'échelle de l'exploitation. In.

Veysset P, Becherel F et Bebin D 2009. Organic suckling cattle farming system in the Massif Central: technical and economic results. *INRA Productions Animales* 22, 189-196.

Veysset P, Lherm M, Hautcolas JC et Bebin D 2000. Un outil d'aide à la décision dans le choix du système d'exploitation en élevage bovin allaitant. In 7èmes Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants, pp. 325-328, Institut de l'Elevage, Paris

Villalba D, Casasús I, Sanz A, Bernués A, Estany J et Revilla R 2006. Stochastic simulation of mountain beef cattle systems. *Agricultural Systems* 89, 414-434.

von Bertalanffy L 1969. *General System Theory: Foundations, Development, Applications* (Revised edition). George Braziller Inc., 296 p.

von Wieren-Lehr S 2001. Sustainability in agriculture - an evaluation of principal goal-oriented concepts to close the gap between theory and practice. *Agriculture Ecosystems & Environment* 84, 115-129.

Wilmink JBM 1987. Adjustment of Test-Day Milk, Fat and Protein Yield for Age, Season and Stage of Lactation. *Livestock Production Science* 16, 335-348.

LISTE DES REALISATIONS SCIENTIFIQUES ET DIVERSES

Production d'outil

Développement d'un modèle conceptuel et d'un simulateur **Dynamilk** à l'échelle de l'exploitation basé sur les interrelations entre le troupeau, les ressources et le management de l'éleveur

Reuves avec comité de lecture

Jacquot AL, Delaby L, Brunshwig G, Pomiès D, Blanc F, Baumont R,. **Dynamilk : a farming system model to explore milk production related to forage system.** (en cours d'écriture, journal ciblé: Animal).

Communications orales

Jacquot AL*, Baumont R, Brunshwig G. **Les exploitations laitières de montagne : développement d'un simulateur dynamique pour explorer les compromis entre performances animales, utilisation durable des ressources prairiales et recherche d'autonomie alimentaire à l'échelle de l'exploitation.** Journée modélisation du département PHASE – INRA (Paris, mars 2011)

Jacquot AL*, Baumont R, Delaby L, Pomiès D, Brunshwig G **Dynamilk: a farming system model to explore a better match between forage and milk production.** The

10th IFSA Symposium 2012 (Aarhus, Denmark, 1-4 July 2012) (Abstract accepté, article en révision)

Jacquot AL*, Baumont R, Delaby L, Pomiès D, Lamadon A, Brunshwig G, **Dynamilk : un modèle à l'échelle de l'exploitation laitière herbagère permettant d'explorer l'adéquation entre les dynamiques des productions d'herbe et de lait.** Les 19^{ème} Rencontres Recherche Ruminants (Paris, France, 7-8 Décembre 2012) (Résumé accepté pour une communication courte)

Affiches dans des congrès internationaux ou nationaux

Jacquot AL*, Baumont R, Brunshwig G, **A modelling approach to evaluate the ability of dairy cows systems in mountain area to balance production and sustainable grassland utilization.** The 15th Meeting of the FAO-CIHEAM Mountain Pastures Network (Les Diablerêts, Suisse, 7-9 October 2009)

Jacquot AL*, Blanc F, Lacour C, Baumont R, Brunshwig G, Agabriel C, **Relations entre périodes de vêlage et conduite des surfaces fourragères : une étude dans les élevages laitiers du Puy-de-Dôme.** Les 17^{ème} Rencontres Recherche Ruminants (Paris, France, 8-9 Décembre 2010)

Jacquot AL, Baumont R, Brunshwig G, **Représentation du troupeau laitier au sein d'un simulateur de l'exploitation laitière en montagne.** Journée de l'Ecole Doctorale (Clermont-Ferrand, mai 2011)

Divers

Jacquot AL, **Evaluation de l'aptitude des systèmes bovins laitiers de montagne à équilibrer les productions animales et l'utilisation durable des ressources – vers la construction d'un simulateur.** Animation scientifique (VetAgro Sup, juin 2010)

Jacquot AL, **Les exploitations laitières de montagne: développement d'un simulateur dynamique pour explorer les compromis entre performances animales, utilisation durables des ressources prairiales et recherche d'autonomie alimentaire à l'échelle de l'exploitation.** Rencontre équipe Sybel-Syslait (Rennes, mai 2011)

Diverses participations aux journées des doctorants de l'URH et de VetAgro Sup

Interventions pédagogiques

- Participation au Module d'*Enquêtes et Statistiques* du cursus Ingénieur option ESP – Elevage et Système de Production en tant que commanditaire de l'étude (2 mois environ)
- Intervention annuelle sur La **Modélisation des Systèmes d'Elevage** dans le Module *Modélisation et Simulation appliquées aux problématiques agro-écologiques* du cursus Ingénieur 2^{ème} année (3h)

- Intervention sur l'**Analyse du fonctionnement d'un système d'élevage laitier herbager en zone contraignantes : étude des marges de manœuvre pour améliorer l'autonomie et les conséquences techniques d'un changement** dans le module de Pré-Option ESP du cursus ingénieur 2^{ème} année, *Pâturage, Bien-être et comportement animal* (10h30).

LISTE DES ABREVIATIONS

AOP : Appellation d'Origine Protégée

EDI : Environnement de Développement Intégré

G : Génisses

ICHN : Indemnités Compensatoires de Handicaps Naturels

IGP : Indication Géographique Protégée

MS : Matière Sèche

OPA : Organisation Professionnelle Agricole

PAC : Politique Agricole Commune

PLpot : Production Laitière Potentielle

PP : Prairies permanentes

PT : Prairies temporaires

RMSD : Root Mean Square Deviation

SAU : Surface Agricole Utile

SF : Surface Fourragère

VL : Vaches Laitières

VLL : Vaches Laitières en Lactation

VLT : Vaches Laitières Taries

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Liste des figures et tableaux

CHAPITRE I

Introduction générale : contexte de la thèse

Figure 1 : Eléments de localisation en France des zones reconnues défavorables	3
Figure 2 : Atouts et caractéristiques des systèmes laitiers herbagers situés en montagne	10
Figure 3 : Eléments abordés (en rouge) et non abordés (en gris) au cours du travail de thèse	12

CHAPITRE II

Approche systémique et modélisation pour l'étude de l'autonomie à l'échelle de l'exploitation

Figure 1 : Réponse dynamique d'un système à une perturbation	19
Figure 2 : Modalités des réponses dynamiques d'un système suite à une perturbation	20
Figure 3 : Représentation de l'exploitation agricole comme un système, composé de sous-systèmes identifiés (A, B et C)	23
Figure 4: Démarche de modélisation, conceptualisation et représentation de la réalité en système complexe	26

CHAPITRE III

Approche systémique et modélisation pour l'étude de l'autonomie à l'échelle de l'exploitation

Figure 1: Eléments contextuels et élaboration de la problématique	35
Figure 2 : Démarche de travail et plan de thèse	41

CHAPITRE IV

Cahier des charges et structure du modèle

Figure 1: Principaux déterminants des cahiers des charges AOP et leurs pratiques associées – les éléments en noir sont inclus dans le modèle contrairement aux éléments en gris	45
Figure 2: Influences des contraintes géographiques, agro-climatiques et de production sur l'usage des parcelles - schéma adapté de Gueringer <i>et al.</i> (2009)	46
Figure 3: contraintes physiques agissant sur les usages possibles des parcelles	47
Figure 4 : Disposition du modèle basé sur les interrelations entre les composants dynamiques des sous-modèles et des processus décisionnels	48
Figure 5 : Diagramme de classes du simulateur Dynamilk présentant son architecture	50
Figure 6 : Décomposition des principales classes en objets	51
Figure 7 : Principales relations (ou méthodes) entre les différentes classes ou objets de Dynamilk	51
Figure 8 : Schéma de fonctionnement chronologique de la simulation	52
Figure 9: Schéma simplifié de l'organisation géographique et utilitaire du parcellaire	55
Figure 10 : Fichier d'entrée descriptif des parcelles avec les usages possibles des parcelles selon les saisons	56
Figure 11: Diagramme de fonctionnement du modèle représentant les flux. Les compartiments structurels sont représentés par les boîtes, les flux de biomasses par les flèches pleines et les fonctions associées à l'âge de la biomasse par les flèches blanches. Les phénomènes rétroactifs ou les actions directes des variables sont représentées par les flèches fines. (Jouven <i>et al.</i> , 2006a)	58
Figure 12 : fichier d'entrée descriptif des parcelles avec la réserve utile (RU), l'indice de nutrition azotée (IN), la composition botanique des parcelles selon les groupes fonctionnels et l'état initial de la biomasse et son âge des quatre compartiments	59

CHAPITRE V

Le sous-modèle « troupeau laitier »

Figure 1: Structure du modèle animal "vache laitière" avec ses trois composants: le sous-modèle de démographie, les aliments de la ration et le sous-modèle dynamique d'ingestion et de production laitière	62
Figure 2: Représentation du troupeau laitier en lots fonctionnels et leurs productions associées (les flèches et accolades noires représentent les productions associées à chaque lot ; les flèches rouges représentent les flux démographiques chronologiques)	64
Figure 3: subdivision du lot des vaches en lactation en quatre catégories	65
Figure 4 : Calcul de la production laitière potentielle (PLpot) selon le mode de calcul « individu pilote » et « individu moyen » sur une distribution de type loi normale (simulation 1)	74
Figure 5: Ecart entre la production laitière de l'individu moyen et l'animal pilote (simulation 1)	75
Figure 6 : Evolution du stade de lactation et de gestation de l'individu moyen au cours de la campagne (Simulation 1)	75
Figure 7 : Calcul de la production laitière potentielle (PLpot) du lot selon le mode de calcul «individu pilote » et « individu moyen » sur une distribution de type groupée avec 2 pics (simulation 2)	75
Figure 8: découpage du troupeau laitier en lots, représentés par l'animal pilote (χ)	76
Figure 9 : schéma du fonctionnement du modèle de mobilisation des réserves corporelles en début de lactation	85
Figure 10 : rôle des coefficients correcteurs de la production laitière en système pâturage tournant simplifié	87
Figure 11 : schéma de l'initialisation de la note d'état et des transitions entre les périodes de lactation, d'une catégorie d'animal à une autre	89
Figure 12: Effets de différentes distribution des vêlages (figure a) sur la production laitière (figure b)	94
Figure 13 : Impacts de paramètres de production sur la production laitière, digestibilité de la ration de base (graph a) et potentiel laitier (graph b)	96
Figure 14 : étude du comportement du modèle au pâturage	99
Figure 15 : comparaison entre les données expérimentales du Lot1 et les valeurs prédites par le modèle de la semaine 1 à 24 post-partum. Les données expérimentales sont présentées avec l'erreur-type associée	102
Figure 16 : comparaison entre les données expérimentales du Lot2 et les valeurs prédites par le modèle de la semaine 1 à 24 post-partum. Les données expérimentales sont présentées avec l'erreur-type associée	102
Figure 17 : Comparaison entre les valeurs observées and prédites de production laitière (kg.VLL-1.j-1) pour le lot 1 (\diamond , droite de régression----) et pour le lot 2 (\bullet , droite de régression---)	103
Figure 18 : comparaison entre un lot expérimental et les valeurs prédites par le modèle en système pâturage tournant simplifié (enchaînement de 6 parcelles, P1 à P6). Les valeurs moyennes expérimentales sont présentées avec l'erreur-type	105
Figure 19 : comparaison des valeurs observées et prédites de PLprod (kg.VLL-1.j-1, \diamond , droite de régression -----)	106
Tableau 1: Présentation des variables d'entrée et de sorties du modèle de démographie	68
Tableau 2 : définition du calcul des poids objectifs des génisses	71
Tableau 3: Présentation des variables du modèle d'ingestion et de production laitière	79
Tableau 4 : paramétrage de la simulation de référence et plage de variation des paramètres de production choisis	95
Tableau 5 : paramétrage de la simulation de référence et plage de variation des paramètres de production choisis	98
Tableau 6 : description des paramètres de simulation des deux lots expérimentaux (Lot 1, Lot 2)	101
Tableau 7 : analyse statistique pour évaluer la précision des prédictions du modèle face aux données observées (Lot 1 et 2)	103
_Tableau 8 : analyse statistique pour évaluer la précision des prédictions du modèle face aux données observées	106

CHAPITRE VI**Le sous-modèle « conduite »**

Figure 1 : Algorithme décisionnel pour le déclenchement de la fauche : cas de la fauche première coupe avec des règles spécifiques (carré gris) pour représenter la possibilité de récolter précocement ou tardivement. Les pointillés représentent le retour à l'étape de l'algorithme qui sera activée le jour d'après.	113
Figure 2: Biomasse au ras du sol d'une parcelle de type « fauche riche », soit selon la typologie développée par Jouven <i>et al.</i> , (2007) une composition de A 40%, B 40%, C 20% et D 0% sur deux années consécutives (2008 et 2009). Trois fauches sont planifiées sur cette parcelle, toutes pour récolter du foin ou des regains séchés au sol. Selon l'année, les dates de réalisation des fauches varient en fonction des conditions de croissance de l'herbe et de la météo.	115
Figure 3 : Allocations des différentes catégories des fourrages aux lots du troupeau laitier	116
Figure 4 : Gestion du déplacement d'un lot de vaches en lactation d'une parcelle à l'autre selon la technique du pâturage tournant simplifié	117
Figure 5 : Présentation du parcellaire « BL15 » construit à partir des données du cas-type BL15	121
Figure 6 : Présentation du parcellaire « GA » construit à partir des données d'enquêtes en exploitation	122
Figure 7 : comparaison des productions laitières mensuelles réalisées entre les valeurs du BL15 et les valeurs modélisées de Dynamilk (histogrammes pour la production laitière et courbes pour la distribution des vêlages)	125
Figure 8 : Exemple du calendrier fourrager et de pâturage du parcellaire BL15 résumant toutes les pratiques ayant eu lieu au cours de l'année 1995 (les fauches sont symbolisées par un trait noir et les parcelles pâturées par un rectangle de couleur spécifique du lot pâturant et d'une longueur correspondant au temps de séjour)	128
Figure 9 : Niveaux de production laitière mensuelle du système "groupé automne" simulés sur deux périodes : 1993-1977 et 2005-2010	131
Tableau 1 : Pratiques de pâturage implémentées dans Dynamilk et leur incidence sur la baisse de production laitière acceptée au cours du temps de séjour sur la parcelle	118
Tableau 2: données comparatives de la production fourragère et du stockage du cas-type BL15	125
Tableau 3 : données comparatives de la composition de la ration de base et de la biomasse ingérée par les vaches en lactation du cas-type BL15	127
Tableau 4 : données comparatives de la production fourragère et du stockage du système "groupé automne"	129

CHAPITRE VII**Quel système pour une meilleure autonomie alimentaire et fourragère à l'échelle de l'exploitation ?**

Figure 1 : distribution des vêlages des deux systèmes étudiés (GA : groupé automne et début d'hiver; GP: groupé fin d'hiver et printemps). La répartition est exprimée en % par semaine	137
Figure 2 : répartition sur l'année de la production laitière potentielle du lot vaches laitières, PLpot, et des apports d'aliments concentrés, indexés sur la PLpot. (Les quantités sont exprimées par animal)	137
Figure 3 : description des deux parcellaires et leurs usages planifiés par parcelle et par saison pratique des systèmes « GA » et « GP »	138
Figure 4 : identification des indicateurs pertinents pour comparer les performances des deux systèmes de production contrastés	141
Figure 5 : Productions laitières moyennes réalisées des deux systèmes simulés (kg.VLL ⁻¹ .an ⁻¹)	143
Figure 6 : productions laitières journalières de chaque année simulée du système "GA"	145
Figure 7 : productions laitières journalières de chaque année simulée du système "GP"	145
Figure 8 : Bilan fourrager des années simulées des deux systèmes « GA » et « GP »	147
Figure 9 : Quantité totale de fourrages récoltés et quantités de fourrages vendus et achetés des deux systèmes simulés (T MS)	148
Figure 10: Rendement et qualité des fourrages récoltés en 1ère coupe (système GA)	150

Figure 11: rendements et qualité des fourrages récoltés en 2ème et 3ème coupe (système GA)	150
Figure 12 : variation de la durée de saison du pâturage des deux systèmes au cours des années simulées	151
Figure 13 : Quantité d'herbe moyenne ingérée par les vaches laitières au cours de la saison de pâturage et le taux d'utilisation de la biomasse des pâtures réservées aux vaches laitières ; en kg.VL ⁻¹ .j ⁻¹	153
Figure 14 : Qualité de l'herbe ingérée par le lot des vaches en lactation (VLL)	155
Figure 15 : Variation de la production laitière annuelle des deux systèmes (en kg.VLL ⁻¹ .an ⁻¹)	156
Figure 16 : productions laitières quotidiennes des années 1999, 2003 et 2005 du système GP	158
Figure 17 : Quantités de fourrages consommés par les vaches en lactation lors de la saison de pâturage pour les deux systèmes simulés (en t)	158
Figure 18 : productions laitières quotidiennes des années 2008 à 2011 du système "GA"	159
Figure 19 : Analyse des relations entre digestibilité des fourrages de première coupe "bonne qualité" et la production laitière annuelle par vache selon les années simulées (en kg.VLL ⁻¹ .an ⁻¹)	159
Tableau 1: composition botanique des parcelles selon leurs usages	139
Tableau 2 : Analyse des productions laitières annuelles selon les deux systèmes étudiés (en kg.VLL ⁻¹ .an ⁻¹)	143
Tableau 3: Analyse de la variabilité de la production laitière moyenne en hiver et au pâturage des deux systèmes simulés (en kg de lait)	144
Tableau 4 : Analyse du bilan fourrager des deux systèmes simulés (T MS.UGB ⁻¹)	147
Tableau 5 : Analyse des fourrages récoltés, achetés et vendus des deux systèmes simulés (T MS)	148
Tableau 6 : Analyse des rendements des fourrages récoltés (T MS.ha ⁻¹) et leurs digestibilités associées (dmo).	149
Tableau 7 : Durée de la saison de pâturage en jours	151
Tableau 8 : Analyse des quantités d'herbe ingérée et des taux d'utilisation de la biomasse sur les parcelles pâturées par les vaches laitières (en kg MS.VL ⁻¹ .j ⁻¹ ; en kg MS.UGB ⁻¹ .j ⁻¹)	153
Tableau 9 : Analyse de la valeur énergétique moyenne de l'herbe ingérée au cours de la saison de pâturage selon les lots (en UFL)	154
Tableau 10 : Analyse de la production laitière autonome selon les saisons, hiver et pâturage, des deux systèmes simulés (en %)	156

CHAPITRE VIII

Incidence du chargement et de la quantité d'aliments concentrés sur l'utilisation de l'herbe, la production laitière et l'autonomie du système de production

Figure 1 : Plan expérimental des simulations effectuées (chargement en UGB.ha ⁻¹ et concentrés en kg.VLL ⁻¹ .an ⁻¹)	164
Figure 2 : Effet du chargement sur les niveaux de production laitière moyenne réalisée par vache dans les deux systèmes, GA et GP, sur les deux séries climatiques étudiées (en kg.VL ⁻¹ .an ⁻¹)	166
Figure 3 : Impact des chargements sur la production laitière par hectare des deux systèmes étudiés	167
Figure 4 : Productions laitières quotidiennes par vache des deux systèmes étudiés sur les deux séries climatiques (en kg.VLL ⁻¹ .j ⁻¹)	168
Figure 5 : Impact du chargement sur le bilan fourrager des deux systèmes et sur les deux séries climatiques	175
Figure 6 : Impact du chargement sur la part du lait "autonome" sur la production laitière totale, en période d'alimentation hivernale (graph a) et en période d'alimentation au pâturage (graph b)	176
Figure 7 : Effet du niveau d'apports d'aliments concentrés dans la ration sur la production laitière moyenne annuelle des deux systèmes étudiés sur les deux séries climatiques et les deux niveaux de chargement (en kg.VLL ⁻¹ .an ⁻¹)	181

Figure 8 : Impact du niveau d'apport des aliments concentrés sur les productions laitières quotidiennes des deux systèmes sur les deux séries climatiques étudiées pour un chargement de 0.94 UGB.ha ⁻¹ soit 51 vaches laitières (en kg.VLL ⁻¹ .j ⁻¹)	182
Figure 9 : Impact du niveau d'apport des aliments concentrés sur les productions laitières quotidiennes des deux systèmes sur les deux séries climatiques étudiées pour un chargement de 1.34 UGB.ha ⁻¹ soit 72 vaches laitières (en kg.VLL ⁻¹ .j ⁻¹)	183
Figure 10 : Impact des niveaux d'apports d'aliments concentrés sur les variables d'utilisation de l'herbe : quantité moyenne d'herbe ingérée au cours de la saison de pâturage, valeur UFL moyenne de cette herbe ingérée et taux d'utilisation de la biomasse accumulée par les vaches au pâturage	185
Figure 11 : Impact du niveau des apports d'aliments concentrés sur le bilan fourrager et sur la part du lait autonome sur la production laitière totale en période hivernale, pour les deux systèmes, sur les deux séries climatiques simulées et pour les deux niveaux chargement 0.94 et 1.34 UGB.ha ⁻¹	189
Figure 12 : Grille de paiement du lait de l'année 2010 (€.1000l ⁻¹) source : Réseaux d'élevage	193
Tableau 1 : Productions laitières moyennes réalisées par vache laitière des deux systèmes étudiés sur les deux séries climatiques (en kg.VL ⁻¹ .an ⁻¹)	169
Tableau 2 : Productions laitières moyennes réalisées par hectare des deux systèmes étudiés sur les deux séries climatiques (en kg.ha ⁻¹)	169
Tableau 3 : Quantité moyenne d'herbe ingérée par vache au cours de la saison de pâturage selon les chargements pour le système "GA" (en kg MS.VLL-1.j-1 et kg MS.UGB-1.j-1)	172
Tableau 4 : Quantité moyenne d'herbe ingérée par vache au cours de la saison de pâturage selon les chargements pour le système "GP" (en kg MS.VLL-1.j-1 et kg MS.UGB-1.j-1)	172
Tableau 5 : Valeur UFL moyenne de l'herbe ingérée au cours de la saison de pâturage par les différents lots du troupeau du système « GA » selon les chargements	173
Tableau 6 : Valeur UFL moyenne de l'herbe ingérée au cours de la saison de pâturage par les différents lots du troupeau du système « GP » selon les chargements	173
Tableau 7 : Taux d'utilisation moyenne de la biomasse sur les parcelles pâturées par les vaches laitières et la quantité de fourrages distribuée au pâturage pour les vaches en lactation du système « GA » selon les chargements (en t)	174
Tableau 8 : Taux d'utilisation moyenne de la biomasse sur les parcelles pâturées par les vaches laitières et la quantité de fourrages distribuée au pâturage pour les vaches en lactation du système « GP » selon les chargements (en t)	174
Tableau 9 : Bilan fourrager des deux systèmes sur les deux séries climatiques simulées selon les chargements (en T.UGB ⁻¹)	177
Tableau 10 : Fourrages achetés et fourrages vendus du système "GA" des deux séries climatiques selon les chargements (en t.an ⁻¹)	178
Tableau 11 : Fourrages achetés et fourrages vendus du système "GP" des deux séries climatiques selon les chargements (en t.an ⁻¹)	178
Tableau 12 : Part du lait "autonome" dans la production laitière réalisée du système "GA" selon les périodes de production, hiver et pâturage, selon les chargements et sur les deux séries climatiques	179
Tableau 13 : Part du lait "autonome" dans la production laitière réalisée du système "GP" selon les périodes de production, hiver et pâturage, selon les chargements et sur les deux séries climatiques	179
Tableau 14 : Impact des niveaux d'apports d'aliments concentrés sur la production laitière moyenne annuelle du système « GA », pour les chargements 0.94 et 1.34 UGB.ha ⁻¹ , pour les deux séries climatiques (en kg.VL ⁻¹ .an ⁻¹)	184
Tableau 15 : Impacts des niveaux d'apports d'aliments concentrés sur la production laitière moyenne annuelle du système « GP », pour les chargements 0.94 et 1.34 UGB.ha ⁻¹ , pour les deux séries climatiques (en kg.VL ⁻¹ .an ⁻¹)	184
Tableau 16 : Impact du niveau d'apports d'aliments concentrés sur les quantités d'herbe ingérée au cours de la saison de pâturage pour le système "GA", pour les chargements 0.94 et 1.34 UGB.ha ⁻¹ , pour les deux séries climatiques (en kg MS.VLL ⁻¹ .j ⁻¹)	187

Tableau 17 : Impact du niveau d'apports d'aliments concentrés sur les quantités d'herbe ingérée au cours de la saison de pâturage pour le système "GP", pour les chargements 0.94 et 1.34 UGB.ha ⁻¹ , pour les deux séries climatiques (en kg MS.VLL ⁻¹ .j ⁻¹)	187
Tableau 18 : Impact du niveau d'apports d'aliments concentrés sur les taux d'utilisation de la biomasse produite par les vaches en lactation au cours de la saison de pâturage pour le système "GA", pour les chargements 0.94 et 1.34 UGB.ha ⁻¹ , pour les deux séries climatiques (en kg MS.VLL ⁻¹ .j ⁻¹)	188
Tableau 19 : Impact du niveau d'apports d'aliments concentrés sur les taux d'utilisation de la biomasse produite par les vaches en lactation au cours de la saison de pâturage pour le système "GP", pour les chargements 0.94 et 1.34 UGB.ha ⁻¹ , pour les deux séries climatiques (en kg MS.VLL ⁻¹ .j ⁻¹)	188
Tableau 20 : Impact du niveau d'apports d'aliments concentrés sur les bilans fourragers pour le système "GA", pour les chargements 0.94 et 1.34 UGB.ha ⁻¹ , pour les deux séries climatiques (en t.UGB ⁻¹)	191
Tableau 21 : Impact du niveau d'apports d'aliments concentrés sur les bilans fourragers pour le système "GP", pour les chargements 0.94 et 1.34 UGB.ha ⁻¹ , pour les deux séries climatiques (en t.UGB ⁻¹)	191
Tableau 22 : Impact du niveau d'apports d'aliments concentrés sur la part de lait « autonome » dans la production totale par saison, hiver ou pâturage, pour le système "GA", pour les chargements 0.94 et 1.34 UGB.ha ⁻¹ , pour les deux séries climatiques (%)	192
Tableau 23 : Impact du niveau d'apports d'aliments concentrés sur la part de lait « autonome » dans la production totale par saison, hiver ou pâturage, pour le système "GP", pour les chargements 0.94 et 1.34 UGB.ha ⁻¹ , pour les deux séries climatiques (%)	192
Tableau 24 : Evaluation des coûts liés à l'économie de consommation des aliments concentrés et à la perte de lait associée en fonction de la grille de paiement du lait de 2010 et d'un prix du concentrés de 258.60 €.t ⁻¹	193

CHAPITRE IX

Discussion générale

Figure 1 : Consommation totale par les vaches en lactation de fourrages conservés et d'herbe pâturée selon les deux systèmes étudiés sur l'année 1999 et 2011 ainsi que sur les chargements 0.94 et 1.34 UGB.ha ⁻¹ (en t MS.VLL ⁻¹)	197
Figure 2 : Consommation totale par les animaux du troupeau de fourrages conservés et d'herbe pâturée selon les deux systèmes étudiés sur l'année 1999 et 2011 ainsi que sur les chargements 0.94 et 1.34 UGB.ha ⁻¹ (en t MS.UGB ⁻¹)	198
Figure 3 : Calendrier de pâturage du système GA, chargement 1.34 UGB.ha ⁻¹ et 1200 kg.VL ⁻¹ .an ⁻¹ de concentrés de l'année 2007	199
Figure 4 : Productions laitières quotidiennes des deux systèmes GA et GP entre le parcellaire normal et le parcellaire consacrant plus de surface à la constitution des stocks (en kg.VLL ⁻¹ .j ⁻¹)	204
Figure 5 : évolution de la note d'état moyenne des vaches en lactation au cours du temps simulé en fonction de la distribution des vêlages (groupé avec le BL15 ou étalé) et selon le potentiel laitier des vaches laitières	208
Tableau 1 : Temps de séjour et biomasse consommée au cours de l'utilisation successive par le pâturage de 7 parcelles au printemps pour le GA avec un chargement de 0.94 (51 VL) et 1.34 UGB.ha ⁻¹ (72 VL).	200
Tableau 2 : Sorties synthétiques des simulations associées à la modification de la surface consacrée aux fauches et au pâturage au printemps pour les deux systèmes et les deux séries climatiques (*les valeurs moyennes notées en vert sont un rappel des valeurs des simulations avec un parcellaire non modifié)	203

TABLE DES MATIERES

Epître Dédicatoire

Sommaire

CHAPITRE I

Introduction générale : contexte de la thèse	1
1.1 Elevages laitiers herbagers en zones contraignantes : quelle place dans l'élevage français ?	2
1.1.1 Multifonctionnalités de l'élevage laitier herbager et services associés	4
1.1.2 Un besoin de se démarquer du marché national en valorisant l'herbe et la qualité	7
1.2 Elevages laitiers herbagers de montagne : des systèmes plus sensibles aux événements climatiques	8
1.3 Hypothèse et stratégie de recherche	10
1.4 Définition des éléments étudiés lors de la thèse	12

CHAPITRE II

Approche systémique et modélisation pour l'étude de l'autonomie à l'échelle de l'exploitation	13
2.1 L'autonomie comme composante de la durabilité	14
2.1.1 Cadre conceptuel	14
2.1.2 Principaux leviers pour améliorer l'autonomie fourragère et alimentaire	15
2.2 Autonomie et adaptabilité des systèmes aux perturbations	19
2.3 Approche systémique et modélisation	23
2.3.1 L'exploitation agricole vue comme un système complexe	23
2.3.2 Du système au modèle puis au simulateur	25
2.4 Les modèles de systèmes de production animale (ou de systèmes d'élevage)	28
2.4.1 Les principaux types de modèles et leurs objectifs	28
2.4.2 Représentation des troupeaux laitiers dans les différents modèles existants	32

CHAPITRE III

Démarche scientifique	34
3.1 Développement des questions de recherche	35
3.2 Démarche méthodologique	37
3.3 Démarche de thèse et plan de thèse	39

CHAPITRE IV

Cahier des charges et structure du modèle	42
4.1 Conception du modèle	43
4.1.1 Quelles informations spécifiques des systèmes d'élevage laitiers herbagers situés en montagnes doivent être prises en compte dans le modèle ?	43
4.1.2 Principaux choix de modélisation et définition des frontières du système	47
4.2 Formalisation du modèle global	49
4.2.1 Du modèle au simulateur Dynamilk : utilisation de l'approche objet	49
4.2.2 Implémentation du modèle	54
4.2.3 Exemple d'application de l'approche objet : le sous-modèle <i>parcellaire</i>	55

CHAPITRE V

Le sous-modèle « troupeau laitier »	60
5.1 Conception du modèle « troupeau laitier »	61
5.1.1 Cahiers des charges de la construction et objectifs du sous-modèle « troupeau laitier »	61
5.1.2 Architecture du sous-modèle troupeau	61
5.2 Représentation du troupeau laitier : le module démographique	63
5.2.1 Choix de modélisation pour représenter le troupeau	63
5.2.2 Construction de la démographie du troupeau et allotement	66
5.2.3 Le modèle démographique : une matrice de calculs des paramètres dépendant de la structure démographique	67
5.3 Définition de « l'animal pilote »	72
5.4 Composition de la ration ingérée	76
5.5 Module dynamique d'ingestion, production laitière et mobilisation des réserves corporelles des animaux	77
5.5.1 Principes	77
5.5.2 Variables du modèle dynamique d'ingestion et de production laitière	79
5.5.3 Modèle dynamique d'ingestion et de production laitière, cas des vaches laitières	80
5.5.4 Conservation des données d'une catégorie d'animal à l'autre : cas des variations de l'état corporel des animaux et de leur poids vif	88
5.5.5 Modèle dynamique d'ingestion et de production laitière, cas des autres lots	90
5.6 Validation du modèle : cas du lot des vaches laitière en lactation	93
5.6.1 Etude du comportement du modèle	93
5.6.2 Validation par rapport à des données expérimentales	101

CHAPITRE VI

Le sous-modèle « conduite »	107
6.1 Structure et fonctionnement du sous-modèle de conduite	108
6.1.1 Définition des objectifs de production et planification	108
6.1.2 Utilisation du concept de « saisons-pratiques » : règle de changement d'une saison à l'autre	110
6.1.3 Description du pilotage des systèmes biotechniques par l'éleveur et de leur fonctionnement	112
6.2 Illustration du fonctionnement du simulateur et validation à l'échelle système	120
6.2.1 Description des systèmes et paramétrage de la simulation	120
6.2.2 Etude comparative entre les données des systèmes étudiés et les données simulées	124

CHAPITRE VII

Quel système pour une meilleure autonomie alimentaire et fourragère à l'échelle de l'exploitation ?	132
7.1 Choix des systèmes étudiés	133
7.1.1 Scénarios et hypothèses	133
7.1.2 Description des scénarios et paramétrage des fichiers d'entrée	135
7.2 Choix des indicateurs pour évaluer les systèmes	140
7.3 Résultats des simulations	143
7.3.1 Performances zootechniques et production laitière	143
7.3.2 Performances du système fourrager	147
7.3.3 Performances du système de production : autonomie et résistances aux aléas climatiques	155

CHAPITRE VIII	
Incidence du chargement et de la quantité d'aliments concentrés sur l'utilisation de l'herbe, la production laitière et l'autonomie du système de production	162
8.1 Quelles sont les marges de manœuvres pour maximiser la valorisation de l'herbe ?	163
8.2 Incidence du chargement	163
8.2.1 Production laitière	166
8.2.2 Utilisation de l'herbe pâturée	170
8.2.3 Autonomie	175
8.3 Incidence du niveau des apports de concentrés	180
8.3.1 Production laitière	180
8.3.2 Utilisation de l'herbe pâturée	185
8.3.3 Autonomie	189
8.3.4 Vaut-il mieux produire du lait ou tendre vers un système totalement autonome ?	193
8.4 En conclusion	194
CHAPITRE IX	
Discussion générale	195
9.1 Les apports de Dynamilk à la construction des compromis entre production et utilisation des prairies	196
9.1.1 Autonomie fourragère et conduite des stocks fourragers	196
9.1.2 Valorisation de l'herbe pâturée	198
9.1.3 Intérêt de coupler la dynamique des besoins avec la dynamique de l'offre herbagère	200
9.1.4 Vers des systèmes plus performants ?	202
9.2 Domaine de validité et contraintes d'utilisation de Dynamilk	205
9.2.1 Processus de validation de Dynamilk	205
9.2.2 Contraintes d'utilisation et domaine de validité	206
9.3 Intérêt et originalité de Dynamilk	210
9.3.1 Perspectives d'utilisations du modèle	210
9.3.2 Perspectives d'évolutions du modèle	213
Conclusion	217
Références bibliographiques	222
Liste des réalisations scientifiques	243
Liste des abréviations	247
Table des illustrations	248
Table des matières	254
Annexes	
Annexe 1 Analyse des cahiers des charges AOP	i
Annexe 2 Document « scénario » du simulateur Dynamilk	xi
Annexe 3 Fonctionnement du modèle démographique	xii
Annexe 4 Enquêtes en exploitation : questionnaire et rendu	xx

ANNEXES

Annexe 1 : Analyse des cahiers des charges

AOP : mise au point d'un cahier des charges

générique

Une analyse des cahiers des charges de plusieurs AOP situées sur une zone géographique montagnarde a été conduite à partir des décrets et des « points principaux à contrôler » édités par l'INAO. Les cahiers des charges analysés sont : beaufort, reblochon, comté, saint-nectaire, cantal et laguiole.

Tout d'abord, nous avons effectué une comparaison des mots-clés des contraintes liées à la production de la matière première : le lait. Nous avons ensuite agrégé ses mots-clés afin de pouvoir élaborer un cahier des charges générique, regroupant les principales contraintes, récurrentes dans tous les cahiers des charges étudiés mais pouvant être exprimées de façon différentes. Ainsi le cahier des charges génériques contient des informations liées :

- l'aire géographique,
- la race et/ou le niveau de production par vaches laitières
- la ration de base fourragère
- la complémentation autorisée
- le degré d'autonomie fourragère et alimentaire des exploitations
- la fertilisation
- les usages des prairies

1. Philosophie du produit : lien terroir

Beaufort	Reblochon	Comté	St-Nectaire	Cantal	Laguiole
<p>Climat : Agriculture basée sur l'exploitation des ressources des vallées (foin) et celles des hauts pâturages recelant une réserve alimentaire riche et abondante</p>	<p>Climat : Froid avec précipitations abondantes, générant à partir de 1000m d'altitude une flore prairiale spontanée diverse et abondante</p>	<p>Géo-climat : Pauvreté des sols calcaires et molassiques, hivers rigoureux et saisons très marquées, permettant le développement de prairies naturelles d'une grande richesse floristique permettant le formation de composés aromatiques dans les fromages</p>	<p>Géo-climat : Production principale sur sols volcaniques Pâtures et prairies où la flore est abondante et parfumée</p>	<p>Géo-climat : Massif des volcans éteints Climat continental largement ouvert à l'influence océanique avec une pluviosité importante</p>	<p>Géo-climat : Plateau de l'Aubrac : climat particulièrement rude avec des températures hivernales très basses, pluviométrie dépassant les 1000mm/an (volcanique granitique et métamorphique)</p>

2. Aire géographique (ayant attrait à la production laitière)

Beaufort	Reblochon	Comté	St-Nectaire	Cantal	Laguiole
<p>Lieu de traite et alimentation dans l'aire géographique</p>	<p>Traite, bâtiment des vaches laitières, pâtures dans l'aire géographique d'appellation</p>	<p>Bâtiment des vaches laitières dans la zone d'appellation</p>	<p>Liste des communes de l'aire géographique</p>	<p>Liste des communes de la zone de production</p>	<p>Liste des communes de l'aire géographique</p>

3. Aspects zootechniques

Limitation de la production

	Beaufort	Reblochon	Comté	St-Nectaire	Cantal	Laguiole
Race VL	Appartenance des vaches du troupeau laitier aux races tarine et abondance	Lait utilisé provenant des troupeaux laitiers composés de races abondance, montbéliarde et tarine	Vache laitière montbéliarde ou simmental ou croisement des 2 races	Vaches laitières nées et élevées dans l'aire géographique (2015)	Troupeau laitier exclusivement né et élevé dans la zone géographique (vaches laitières et génisses)	Vaches de race simmental française ou aubrac
Niveau de production du troupeau	< 5000 kg/ VL en lactation/an	Quantité totale de lait produit sur l'exploitation toute destination confondue est inférieur à 500 000kg.an ⁻¹	Plafonné à 4600 litres de lait par hectare de SF			Production moyenne par vaches laitières : 6000l.VL ⁻¹ .an ⁻¹

Complémentation :

	Beaufort	Reblochon	Comté	St-Nectaire	Cantal	Laguiole
Quantité		Pas plus de 1800 kg.VL ⁻¹ .an ⁻¹ et 250 kg.animal ⁻¹ .an ⁻¹ pour les génisses	Pas plus de 1800 kg.VL ⁻¹ .an ⁻¹	Ne peut dépasser 30% de la ration total MS.VL ⁻¹ .an ⁻¹ pour les vaches laitières uniquement	-Ne peut dépasser 1800 kg.VL ⁻¹ .an ⁻¹ -Pour les génisses, le concentré ne peut excéder 30% de la ration totale en MS.an ⁻¹	-les aliments compléments ne peuvent dépasser plus de 6kg.VL ⁻¹ .j ⁻¹ en lactation en moyenne sur le troupeau et sur l'année
Nature de la complémentation	Utilisation stricte de matière végétale non OGM et inscrite sur une liste positive	Utilisation stricte d'aliment non-OGM (simple ou composé) inscrit sur une liste positive	Utilisation stricte de matière végétale non OGM et inscrite sur une liste positive	Utilisation stricte d'aliment non-OGM (simple ou composé) inscrit sur une liste positive	Utilisation stricte d'aliment non-OGM (simple ou composé) inscrit sur une liste positive	Utilisation stricte d'aliment non-OGM (simple ou composé) inscrit sur une liste positive
Période estivale	Uniquement les vaches laitières. Au max 1,5 kg.VL ⁻¹ .an ⁻¹ en alpage (uniquement céréale av 1er août) Au max 2.5 kg.VL ⁻¹ .j ⁻¹ en prairie en vallée					
Période hivernale	1/3 max du poids de la ration de base en hiver					

Constitution de la ration de base :

	Beaufort	Reblochon	Comté	St-Nectaire	Cantal	Laguiolle
Conservation des fourrages	Interdiction d'ensilage ou autres aliments fermentés (sur l'exploitation, les bâtiments et les terrains)	-Interdiction d'ensilage ou autres aliments fermentés pour le troupeau laitier -Conservation devant respecter l'intégrité des fourrages (odeur, goût du lait, contamination bactériologique)	-Interdiction d'ensilage ou autres aliments fermentés -Mash interdit -Tout produit détériorant l'intégrité des fourrages interdit	-2020 interdiction de fourrages fermentés (<80%MS) (en train d'être revu) -Tout produit détériorant l'intégrité des fourrages est interdit	-Conditions de conservation des fourrages assez strictes, notamment ensilage et enrubannage. Les vaches laitières ne doivent pas ingérer des fourrages détériorant le goût du lait -Affouragement vert interdit	-Ensilage de maïs interdit -Ensilage d'herbe ou enrubannage ne peuvent être incorporés dans les rations du troupeau laitier uniquement s'ils sont issus d'herbe préfanée -Agents autorisés pour la conservation des ensilages d'herbe : ferments lactiques et chlorure de sodium
Origine des fourrages	-Alimentation : essentiellement fourrages issus de la zone géographique. -Au mini 75% des besoins en foin et pâture doivent provenir de l'air géographique	-Alimentation : essentiellement fourrages issus de la zone géographique. -75% des besoins annuels du troupeau (herbe pâturée et fourrage sec) doivent provenir de l'aire géographique	Uniquement de la zone AOC sauf dérogation en cas d'évènement exceptionnel	Fourrages grossiers issus d'herbe produite sur la zone AOC	Fourrages grossiers produits sur la zone AOC	-Fourrages grossiers produits sur la zone AOC -Les seuls fourrages grossiers autorisés sont composés de la flore locale des prairies et PP, ainsi que des graminées et légumineuses fourragères cultivées des PT

	Beaufort	Reblochon	Comté	St-Nectaire	Cantal	Laguiole
Constitution de la ration de base	<p>-Période estivale : herbe pâturée</p> <p>-Période hivernale : foin à volonté (au mini 13 kg.VL⁻¹.an⁻¹) + possibilité de 3 kg.VL⁻¹.an⁻¹ de luzerne déshydratée au maximum</p> <p>-Période transition : mixte</p>	<p>-Période estivale : herbe pâturée, au moins 120j</p> <p>-Période hivernale : foin ou regain à volonté, Luzerne déshydratée autorisée en bouchon jusqu' à 3 kg.VL⁻¹.an⁻¹</p> <p>-Affouragement en vert : autorisé mais limité à 25% de la ration journalière (maïs vert d'automne autorisé)</p>	<p>-Période estival : herbe pâturée, affouragement vert autorisé sur 1 seul repas quotidien</p> <p>-Période hivernale : foin ou regain à volonté</p>	<p>-Herbe provenant de l'aire géographique</p> <p>-Période estivale : 140j de pâturage minimum</p> <p>-Période hivernale & transition : fourrage sec (>80% MS) représenté quotidiennement au moins 50% de la ration MS</p> <p>-Génisses : composé exclusivement d'herbe (à 40% mini provenant de la zone AOC)</p> <p>-zéro pâturage interdit</p>	<p>-70% au mini de la ration est constituée d'herbe pâturée et/ou conservée</p> <p>-Période estivale : Au mini 120j de pâturage pdt lequel le pâturage doit couvrir au moins 70% de la ration de base exprimé en kg MS/VL/j</p>	<p>-Période estivale : Pâturage mini 120j, principalement composé d'herbe pâturée (l'apport de fourrages en complément ne doit pas dépasser 3 kg.VL⁻¹.an⁻¹)</p> <p>-Période hivernale : au mini 30% MS de la ration de base doit être du foin</p>

4. Fertilisation et usages des prairies

	Beaufort	Reblochon	Comté	St-Nectaire	Cantal	Laguiole
Usages des prairies	Entretien des pâturages d'alpage : conduite traditionnelle du troupeau en pâture ou au repos (éparpillement normal des déjections)	120j de pâture chargement maximum de 1.4 UGB.ha ⁻¹	-Zéro pâturage interdit. -Surface en herbe : au moins 1Ha.VL ⁻¹ -Chargement 1,3 UGB.ha ⁻¹ de SF -15% de la SF au maximum est alloué à une prairie de - de 5ans ou 1 légumineuse pure ou associée. Le reste doit être au moins avec 3 types d'espèces	-Zéro pâturage interdit -Chargement 1,4 UGB.ha ⁻¹ SFP -90% de la surface en herbe doit être de la PP -Cahier de pâturage maintenu -Registre parcellaire de la nature des prairies doit être tenu	-Chargement : 1 ha SAU.VL ⁻¹ -Affouragement vert interdit -Zéro pâturage interdit	
fertilisation	-Essentiellement organique -Boues de station interdite -Epannage des fumiers et lisiers sur alpages ou prés de fauche	-Haute montagne et montagne 1 : 33.5 U N.ha ⁻¹ .an ⁻¹ Montagne 2 et 3 : 60 U N.ha ⁻¹ .an ⁻¹	Au maximum 50 U N.ha ⁻¹ .an ⁻¹ sur SF	-130 U N.ha ⁻¹ dont au max 60 U N minérale.ha ⁻¹ -Compost, lisier, purin + fumure organiques d'origine non agricole en enfouissement immédiat -latence de 21j après fertilisation minérale	-Compost, lisier, purin + fumure organiques d'origine non agricole en enfouissement immédiat	

5. Dérogations possibles

	Beaufort	Reblochon	Comté	St-Nectaire	Cantal	Laguirole
Ration totale		L'approvisionnement en MS total ne provenant pas de l'aire géographique ne doit pas dépasser 40%		En cas de période de sécheresse, aléas climatique ou autres circonstances exceptionnelles, il y a des dérogations possibles exprimées par l'INAO	En cas de période de sécheresse, aléas climatique ou autres circonstances exceptionnelles, il y a des dérogations possibles exprimées par l'INAO	
Complémentation	En cas d'incidents climatiques pour les vaches laitières en période estivale					
Fourrages	Apport de fourrages produits à l'extérieur de la zone en appoint de la ressource locale En cas d'insuffisance de foin, 75% mini de la prod laitière annuelle doit être obtenue à partir de fourrage provenant de l'aire géographique/ Au mini 20% des besoins en foin du troupeau laitier proviennent de l'aire géographique	L'appoint de fourrage en provenance de l'extérieur ne peut excéder plus de 25% des besoins annuels de l'exploitation pour le troupeau laitier.	Uniquement fourrage de la zone AOC sauf cas exceptionnel	Affouragement vert interdit	Quand le pâturage ne suffit plus, 5kg MS de foin peut être apporté en complément aux VL ¹	Lors de pénurie exceptionnels, des fourrages extérieurs à l'aire géographique peuvent être utilisés après autorisation de l'INAO

A la suite de ce travail d'analyse des cahiers des charges, nous avons pu dessiner l'ossature d'un cahier des charges générique :

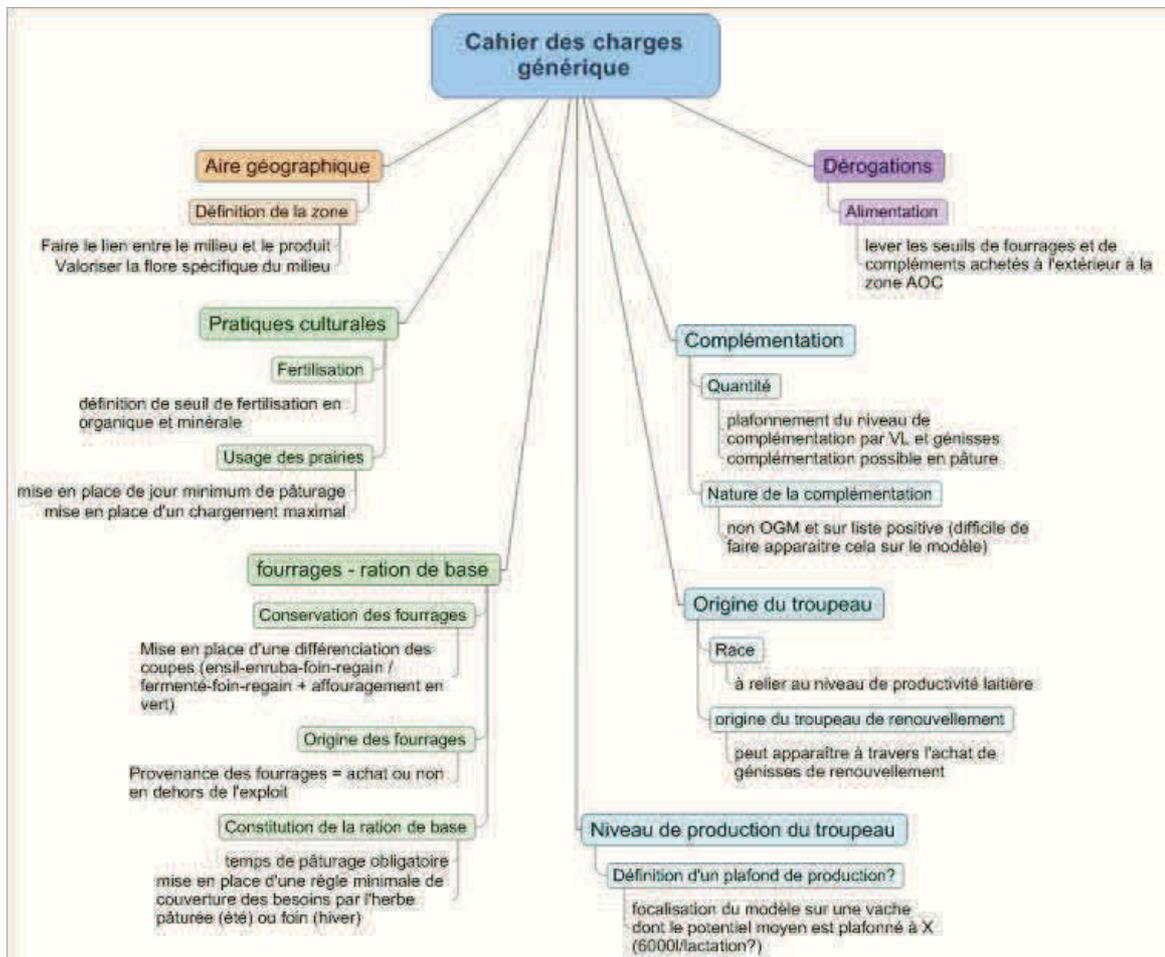


Figure 1 : Cahier des charges générique liée à la production laitière

Annexe 2 : Document « scénario » du simulateur Dynamilk

scenario :	nom de la simulation	Créé le répertoire dans lequel les résultats se trouveront				
Fichier_param:						
Repertoire_definition	def					
1-Climat	defClimat_M93-11.csv					
2-Ftype	defFtGroup.csv			typo : A,B,C,D		
3-Parcellaire	defParcelle_nomsimul.csv			25 parcelles		
4-Troupeau	defTroupeau_nomsimul.csv			42VL = 2 lots (1-VLL,2-VLT)		
Repertoire_resultat	res					
Saison :	Hiver	Deprimage	Printemps	Été	Automne	
finSaison	130	140	214	254	299	
faucheObligatoire(O/N)	N	N	O	O	N	
Fauche :	tte saison	Prt-precoce	Prt-tardive	été	Automne	
Hauteur de coupe	5					
BM Mini	0	2000	2500	1500	1000	
somTp - precoce	0	780	1100	0	0	
JrSansPluie	0	2	3	3	3	
PrecipitationMini (mm)	4					
JrArrêt des fauches	263					
%sauJr/Sautot	0.1					
Stock:						
capStockage (Tonne)/ UGB	4.5					
stockInitial (Tonne)/UGB	3	FoinMeilleur	FoinMoinsbon	Regain		
omd_stock initial	0.678	0.678	0.628	0.684		
%recolte dans BonStock	0.6	VLT				
Txregain / TxFoin	0.3	0.2				
Coeff perte fauche	0.1					
Paturage :						
typPat	5				typPat	%Plmax
TxBaisse Prod Lait	0.9	VLT	Ge		très severe	3.5 80%
Paturage NbJrMaxi	10	12	15		sévère	4 85%
Deprimage NbJrMaxi	2				normal	5 90%
Hauteur d'entrée (cm)	8				libéral	6 92%
BM Mini	1					
Moy Tp4jours debut Paturage	4					
Moy Tp4jours fin Paturage	4					
indice Selectivité	1					
Alimentation :						
Stabulation	1.1		(1.1=libre, 1=entravée)			
UFL_Concentré	1					

Matrice des calculs partiels de capacités d'ingestion et de besoins

Les calculs sont effectués selon la même base que ceux présents dans la matrice de PLpot, ils dépendent donc de la matrice des effectifs et des stades physiologiques de chaque individu ainsi que du paramétrage du troupeau laitier (*PVnais*). Ces équations sont issues du modèle développé par l'Inra (Faverdin et al., 2007).

$$Coeff\ Besoins = 0,00072 \times PVnais \times e^{0,116 \times SemG}$$

$$Coeff\ Capacité\ Ingestion = IL \times IG \times IM$$

Avec :

$IL = a + (1 - a) \times (1 - e^{-0,16 \times SemL})$ avec $a=0,6$ pour les primipares et $a=0,7$ pour les multipares

$$IG = 0,8 + 0,2 \times (1 - e^{-0,25 \times (40 - SemG)})$$

$$IM = -0,1 + 1,1 \times (1 - e^{-0,08 \times \hat{age}})$$

Matrice de distribution du concentré :

Ainsi, la quantité totale annuelle ($Qctot_{annuel}$) est répartie sur le début de lactation ($Qctot_{1-12sem}$) et la 2^{ème} partie de lactation ($Qctot_{13-44sem}$) (en kg MS de concentrés) selon un coefficient de répartition ($coeff_{rep}$) :

$$Qctot_{1-12sem} = coeff_{rep} \times Qctot_{annuel}$$

Et $Qctot_{13-44sem} = (1 - coeff_{rep}) \times Qctot_{annuel}$

On calcule ensuite la quantité de concentrés à apporter selon les quantités de lait attendues ($CoeffQC$, en g par litres de lait):

$$CoeffQC_{1-12sem} = \frac{Qctot_{1-12sem}}{\left(\frac{\sum_{1-12sem} PL_{pot}}{effectif_{1-12sem}} \right)}$$

On peut ensuite déduire de la quantité à distribuer chaque jour aux animaux de chaque catégorie (QC_i avec i la catégorie d'animal en kg MS) :

$$QC_i = CoeffQC_i \times PL_{pot_i}$$

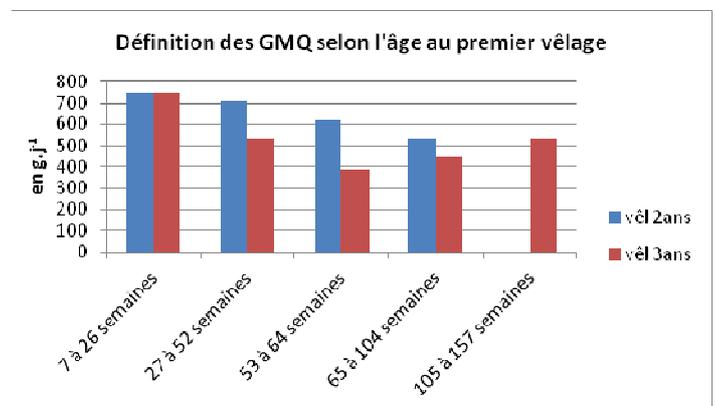
Définition des Gains Moyens Quotidiens (GMQ)

A partir des poids objectifs définis, nous pouvons calculer les GMQ associés aux tranches d'âge pour toute la croissance des génisses à partir de l'équation :

$$GMQ = \frac{[\text{poids objectif 2} - \text{poids objectifs 1}]}{[(\text{âge du poids objectif 2} - \text{âge du poids objectifs 1}) \times 30,5]} \times 1000$$

On multiplie l'âge par 30,5 quand l'âge est exprimé en mois ou 7 quand il est en semaines.

tranche d'âge	GMQ (g/j)	
	vêl 2ans	vêl 3ans
7 à 26 semaines	750	750
27 à 52 semaines	714	535
53 à 64 semaines	619	386
65 à 104 semaines	535	446
105 à 157 semaines		535



Une matrice des GMQ est donc créée selon les catégories d'âge des génisses (G0, G1 et G2) sur la même base que les matrices construites pour les vaches laitières.

Nous avons donc le GMQ de l'ensemble des animaux correspondant à leur stade de croissance selon une moyenne pondérée. Ce GMQ est ensuite agrégé à l'échelle de l'individu-pilote (A pour chaque catégorie de génisses).

Définition du GMQ de l'animal-pilote

A partir des GMQ définis ci-dessus, une matrice des GMQ moyens a été créée pour calculer le GMQ de l'animal-pilote de la catégorie d'âge de génisses. Il y a une matrice par catégorie d'âge.

Définition du besoin de l'animal pilote selon sa courbe de croissance

Le modèle de démographie permet de calcul les besoins dus à la croissance des génisses selon leur catégorie d'âge, leur GMQ et leur PV à un temps donné selon l'équation :

$$\text{Besoins} = \{0,0435 \times \text{GMQ}^{1,4} \times \text{PV}^{0,75}\} / 7115$$

La matrice est construite sur la même philosophie que toutes celles présentées ci-dessus.

Définition de la capacité d'ingestion de l'animal pilote selon son poids vif

$$\text{CI} = \text{Itype} * \text{PV}^{0,9}$$

Avec I type pour la génisse laitière = 0,039

Pour les animaux dont le poids est au dessus de 300kg,

Il faut rajouter 0,2 UEB pour PV <150 kg et 0,1 pour 150 < PV < 290 kg

Attention, ici la capacité d'ingestion est exprimée en UEB.

Annexe 4 : Enquêtes en exploitations : questionnaire et rendu

Enquête ESP 2009

CARACTERISATION DES SYSTEMES FOURRAGERS DES EXPLOITATIONS LAITIERES EN MONTAGNE

CONSIGNES

Présenter le plan du questionnaire et expliquer son déroulement à l'agriculteur

Identification de l'exploitation :

Commencer l'enquête par une présentation/historique par l'agriculteur, remplir lors de son discours les questions de la partie « informations générales », compléter ensuite les informations manquantes.

Caractérisation générale du système de production :

Conduite animale :

10. Connaître l'effectif permet de voir les différentes catégories d'animaux présents dans le troupeau et permet de préparer le remplissage du schéma d'allotement.

11. Remplissage du schéma d'allotement

Légende du schéma d'allotement

Un lot est un groupe d'animaux physiquement ensemble et conduits de la même façon.

- Demander le nombre de lots organisationnels (prise en compte de tous les herbivores)
- Positionner les lots sur le haut du schéma d'allotement en précisant leur composition (les identifier)
- Dérouler le devenir des lots sur l'année à partir de novembre 2008 (en respectant la légende) en positionnant
 - les changements de localisation des lots (stabulation, pâturage (en particulier mise à l'herbe, date de pâturage jour et nuit, date de fermeture de silo), date prévue ou effective de rentrée à l'étable à l'automne 2009...),
 - les changements de lots, les entrées et sorties d'animaux (achats, ventes, réformes) la précision porte surtout sur les lots lors de la période de pâturage
- Plaquer ensuite l'alimentation pour les lots, depuis novembre 2008 à novembre 2009 : numéroter les types de rations à partir de 1, en matérialisant pour chacun le début et la fin de la distribution. Identifier les périodes de transition par RT
- Reporter le numéro de la ration dans le tableau d'alimentation et en détailler le contenu (pas pour les transitions) si ce n'a pas été fait au préalable.

👉 Bien vérifier que les dates-clés soient renseignées par lots :

- Date de mise à l'herbe selon les lots
- date de pâturage jour et nuit
- fermeture du silo
- date de la fin du premier tour de pâturage
- date de mise à l'herbe sur les repousses de fauches
- date de rentrée à l'étable

👉 Au pâturage, les changements de parcelles seront positionnés a posteriori (en remplissant le descriptif des parcelles)

Type d'animaux :

VL adultes: vaches en lactation ; **BLEU foncé**

VT: vaches tarées ; **BLEU clair**

GL₂₋₃ : génisses laitières de 2 à 3 ans ; **VERT foncé**

GL₁₋₂ : génisses laitières de 1 à 2 ans ; **VERT clair**

GL₀₋₁ : génisses laitières de 0 à 1 an ; **VIOLET**

Veaux : veaux ou broutards non sevrés ; **VIOLET**

Localisation des animaux :

Pâturage

Jour et nuit

Stabulation

Jour et nuit

Stabulation nuit

Pâturage jour

Événement dans la vie des lots d'animaux :

Début et fin de lot : ●

Début et fin de la période de tarissement : T ■

Ration 1 : R Rx - Ration de transition : Rt

12. Rations hivernales et complémentation au pâturage par lots d'animaux

Description des rations hivernales et de la complémentation au pâturage la plus précise possible

👉 Précisez le type ou les types de fourrage présents dans la ration de base, les quantités

👉 Précisez la nature et quantité du concentré utilisé

👉 Veillez à bien noter l'unité employée par l'agriculteur

Peut-être remplie en parallèle du schéma d'allotement

13. Pour la saison hivernale à venir, les rations seront-elles identiques ? (dans un même ordre de grandeur).

Le but ici est de savoir si les rations d'une année sur l'autre ont une même base commune.

Conduite des ressources fourragères

L'objectif est ici d'avoir une vision précise du parcellaires, de l'usage des parcelles et des pratiques fourragères.

👉 Demandez les photos du parcellaire plan PAC pour une copie ou demandez une photocopie directement

14. schéma de la disposition de l'exploitation avec l'agriculteur (disposition des plus gros îlots par rapport au siège/bâtiment)

Cette question permet d'avoir une vision globale et grossière de la disposition de l'exploitation et de l'emplacement des parcelles.

15. Recensement des caractéristiques de toutes les parcelles en se basant sur les photos du plan PAC

Remplissage de la première partie du **tableau 1** :

Toutes les parcelles selon leur numérotation (ordre), leur nom associé de leur surface.

En parallèle, notez l'appartenance des parcelles à un îlot dans le dessin effectué dans la question précédente)

👉 Bien vérifier que le total des surfaces des parcelles doit correspondre à la SAU

(Cette étape permet à l'agriculteur de se remettre en tête l'ensemble de son parcellaire)

16. Remplissage des caractéristiques des parcelles

Pour chaque parcelle recensée, veuillez bien à avoir toutes les informations demandées dans le **tableau 1**.

Explication des différentes catégories du tableau 1 :

Le type de couvert :

- Prairie permanente (PP) si âgée de plus de 5 ans,
- prairie temporaire (PT) si âgée de moins de 5 ans. En cas de prairies temporaires, préciser le type de semis et sa date.
- Estives (privées)
- Autres en précisant ce que c'est (ex : céréales, luzerne)

Altitude : moyenne de la parcelle

Distance parcelle – siège : permet de renseigner la distance pour travailler les parcelles que l'agriculteur doit parcourir, en cas de salle de traite en bâtiment fixe, permet d'évaluer le temps de marche des vaches laitières. (Référence : porte de la parcelle)

Lieu de traite mobile : est-ce que la parcelle est un lieu de traite ou pas (ici, nous voulons ce que l'agriculteur fait, pas ce qu'il pourrait faire)

Fauchable : la parcelle est-elle fauchable ou non ?

👉 Nous voulons ici déterminer « le potentiel » selon les critères de l'agriculteur. Elle peut être fauchable mais ne jamais être fauchée

👉 Si une partie seulement de la parcelle est fauchable, marquer un pourcentage associé à la parcelle

Ependable : la parcelle est-elle autorisée à recevoir un apport de fertilisation ? (autorisation ou non selon la présence de cours d'eau par ex.)

👉 Si une partie seulement de la parcelle est épendable, marquer un pourcentage associé à la parcelle

Démarrage de la végétation : l'agriculteur donne son jugement sur la parcelle relativement aux autres parcelles: si le démarrage est tardif (T), normal (N) ou précoce (P)

(Si possible noter en aparté sur quels critères l'agriculteur juge le démarrage de ces parcelles)

17. Remplissage du **tableau 2** « calendrier fourrager »

Rappel des consignes et proposition de méthode pour le remplissage du tableau 2:

→ Commencer le remplissage par les récoltes, puis le pâturage et enfin, la fertilisation et les interventions d'entretien. Finir par l'utilisation habituelle des parcelles.

→ Expliquer le déroulement du remplissage à l'agriculteur avant de commencer (mobilisation de données, carnets...)

→ Ne pas hésiter à faire répéter, confirmer et vérifier la cohérence des informations

→ A la fin du remplissage du calendrier fourrager, reprendre chaque lot et récapituler avec l'agriculteur le calendrier de pâturage (vérification qu'il n'y ait pas de « trou », de disparition d'un lot pendant x temps)

→ Remettre au propre, très rapidement après l'enquête en s'appuyant sur les informations prises et comprises par les deux enquêteurs

👉 Ne pas oublier :

- Une parcelle peut avoir plusieurs usages (découper la parcelle en sous-parcelle d'usage avec leur surface et leur usage)
- Il est possible qu'une parcelle ne soit pas utilisée ou sous-utilisée, demander la confirmation à l'agriculteur

Explications des informations à collecter :

- Récolte :

Le type de récolte selon le code préétabli

La date de récolte (la plus précise possible)

La surface récoltée avec le rendement associé (le plus précis possible ex : T MS/ha, nb de bottes avec type et poids des bottes...)

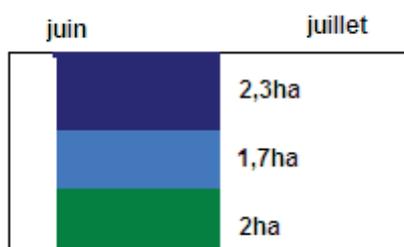
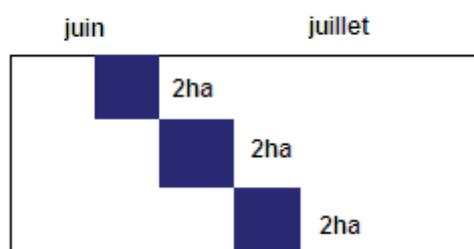
- Pâturage :

Il existe deux approches possibles : *par parcelle* (quels lots passent sur cette parcelle et à quelle période) ou *par lot* (quelle est la succession de parcelles visitées par un lot). Choisir l'approche qui convient le mieux à l'agriculteur.

👉 Ne pas oublier de renseigner si :

Un lot préalablement défini peut se subdiviser sur plusieurs parcelles au même moment ou une parcelle peut accueillir plusieurs lots (fig 2.). Un lot peut ne pas occuper la parcelle entière et évoluer sur cette parcelle au cours du temps (fig 1.) Dans ce cas-là, bien le notifier.

Les VL peuvent être sur différentes parcelles en fonction du jour et de la nuit.



- Fertilisation azotée :

Décrire les apports de fertilisation (nature, quantité (unité N/ha), dates les plus précises possible). Pour la fertilisation minérale, nous nous occupons que de l'azote.

- Intervention d'entretien :

Gyrobroyage, chaulage, entretien spécifique...

- Utilisation habituelle :

Renseigner si la parcelle est affectée à un usage particulier et systématique (fauche, pâture VL,...). Si sur la campagne 2009, cet usage change, l'indiquer ainsi que la raison.

18. D'une année sur l'autre, pratiquez-vous des changements importants dans votre conduite des ressources fourragères et du troupeau au pâturage ?

Cette question permet de déterminer les invariants et la flexibilité des pratiques de l'agriculteur d'une année sur l'autre. Bien noter l'ordre de grandeurs des changements s'il y en a.

👉 Les informations importantes sont : date de mise à l'herbe, phase de transition, date de fin du premier tour, date de rentrée à l'étable, composition et effectif des lots...

Stocks et bilan fourrager

19. Récapitulatif des récoltes – campagne 2009

👉 Veillez à bien spécifier l'unité employée par l'agriculteur. Si l'unité est une balle, un silo, demander une évaluation des poids.

- Stock début de récolte 2009 :

Demander une évaluation rapide à l'agriculteur des stocks qu'il avait avant le début de la récolte 2009. L'évaluation ici n'est pas quantitative car trop fastidieuse, juste utiliser beaucoup, un peu et pas de stocks.

- Achat et vente :

Demander si il a acheté ou vendu du fourrage à partir de la mise à l'herbe 2009 (campagne de pâturage 2009), quelle était la quantité achetée ou vendu, et le ou les types de fourrages.

Cette question servira ultérieurement, lors d'une deuxième série d'enquêtes.

20. Bilan fourrager :

Convenir de la définition d'une année normale. Selon le contrôle laitier, 2009 peut être considéré comme étant une année normale.

21. question sur l'autonomie fourragère – les années en excès :

22. idem – les années en déficit :

Ces deux questions sont faites pour connaître les pratiques d'ajustement des éleveurs en cas d'années excédentaires ou déficitaires.

👉 Poser la première partie de la question, laisser parler l'éleveur et ensuite proposer diverses pratiques possibles.

Si l'éleveur ne se souvient pas de manière précise, il faut le faire parler sur les trois dernières années et sur les années exceptionnelles.

Bâtiments

Les questions de cette partie permettent de savoir si certaines pratiques sont notamment dues à une contrainte structurelle, ici les bâtiments, stabules ou de stockage, et limite l'adaptabilité du système de production face aux aléas climatiques.

Enquêteurs :

Date d'enquête :

QUESTIONNAIRE D'ENQUETE

CARACTERISATION DES SYSTEMES FOURRAGERS DES EXPLOITATIONS LAITIERES EN MONTAGNE

Présenter le plan du questionnaire et expliquer son déroulement à l'agriculteur

INFORMATIONS GENERALES

Identification de l'exploitation :

1. Nom de l'exploitation et de l'exploitant :

2. Adresse du siège :

3. Demander une présentation **en quelques minutes** de l'exploitation par l'agriculteur
(présentation générale et historique rapide)

4. Statut juridique :

(1) EA individuelle (2) GAEC (3) EARL (4) Autre :

5. Altitude du siège

Caractérisation générale du système de production

• Caractérisation des surfaces :

6. SAU (ha) :

Dont Prairies permanentes (PP et PT âgée > 5ans – hors estive) :

Prairies temporaires (PT âgée < 5ans):

Estives : -privée : -collective :

Autres : (à préciser)

- Caractérisation de la production laitière :

7. Quota (litres campagne 2008/2009) :

8. L'avez-vous réalisé ?

.....

.....

9. Y a-t-il une période de creux ou pic de production au cours de la campagne laitière?
(préciser le moment du pic ou creux et s'il y a un creux, y a-t-il un moment de fermeture de la salle de traite)

.....

.....

.....

.....

CONDUITE ANIMALE

10. Quels sont les effectifs d'animaux ? (au jour enquêté)

Vaches traites	VL taries	VL réforme à l'engrais	G ₂₋₃	G ₁₋₂	G _{5mois-1}	taureaux	Veaux 0-5mois	Autres (à préciser)

11. Remplissage du schéma d'allotement (**feuille A3 + cf Notice du schéma d'allotement**)

12. Quelles sont les rations hivernales et complémentations au pâturage par lots d'animaux ?

Lot	N° ration	Début et fin de la période	Quantité de fourrage <i>Préciser /jour ou /repas, /animal ou /lot, MS ou MB</i>	Quantité de concentré <i>Préciser /jour ou /repas, /animal ou /lot, MS ou MB</i>

13. Pour la saison hivernale à venir, les rations seront-elles identiques ? (*même ordre de grandeur*)

.....

.....

.....

.....

.....

CONDUITE DES RESSOURCES FOURRAGERES

14. Avec l'aide de l'agriculteur, faire un dessin de la disposition de l'exploitation (siège avec bâtiments, disposition des îlots par rapport au siège)

15. Recensement des toutes les parcelles selon le tableau récapitulatif PAC des parcelles utilisées par l'agriculteur et les photos aériennes du plan PAC

Remplissage de la première partie du **tableau 1**

16. Remplissage des caractéristiques des parcelles (**tableau 1**)

17. Remplissage du **tableau 2** « calendrier fourrager »

18. D'une année sur l'autre, pratiquez-vous des changements importants dans votre conduite des ressources fourragères et du troupeau au pâturage ?

(Date de mise à l'herbe, phase de transition, date de fin du premier tour, date de rentrée à l'étable, composition et effectif des lots...)

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Stocks et bilan fourragers

19. Récapitulatif des récoltes – Campagne 2009 :

<i>préciser matière sèche ou brute (MS/MB)</i>	Quantité récoltée	Nombre d'unités*	Poids d'unité*	Stock début récolte 2009 (1)	Achat (2)	Vente (2)	Surface récoltée (ha) à remplir à postériori
Foin							
Regain							
Enrubannage							
Ensilage d'herbe							
Foin ventilé							

* unité : balle, silo, ...

(1) : beaucoup, un peu, pas de stock

(2) : sur la période pâturage 2009

20. Bilan fourrager : en règle générale (année dite normale), êtes-vous ?

- Déficitaire (évaluation en quantité du déficit :
- Autosuffisant
- Excédentaire (évaluation en quantité de l'excès :

21. Depuis 2000, avez-vous été en manque de fourrage ?

Comment avez-vous géré ces manques de production fourragère (pâturage ou récolte) ?

Acheter des aliments concentrés ou/et des fourrages

.....
.....

Allonger la période de pâturage

.....
.....

Changer l'alimentation des vaches (sous-alimentation passagère, complémentation...)

.....
.....

Vendre des animaux

.....
.....

Diminuer les objectifs de production

.....
.....

Modifier l'équilibre fauche/pâturage

.....
.....

Tarir des vaches pour décharger les pâtures

.....
.....

Autre solution (à préciser)

.....
.....

22. Depuis 2000, avez-vous été en situation d'excès de fourrage ?

.....

Comment avez-vous géré ces excès de production fourragère (pâturage ou récolte) ?

Vendre du fourrage

.....

Récolter précocement pour privilégier la qualité

.....

Constituer des stocks prévisionnels (garde pour l'année suivante)

.....

Modifier le mode de récolte

.....

Acheter des animaux

.....

Modifier les objectifs de production

.....

Modifier l'équilibre fauche/pâture

.....

Autre solution (à préciser)

.....

BATIMENTS

23. Vos bâtiments vous imposent-ils un mode de récolte et/ou de stockage particulier ?

Oui

Non

Répartition des vêlages et conduite de la reproduction

Sur quels leviers d'action de la conduite de la repro, les éleveurs peuvent-ils agir pour améliorer l'adaptabilité de leur système ?

28. Les vêlages sont-ils groupés ou étalés ?

Si groupés, sur quelles périodes ? Comment faites-vous pour maintenir cette répartition ?

.....

.....

.....

.....

.....

.....

29. Cette répartition est-elle voulue ? Si oui, pour quelles raisons avez-vous choisi cette répartition des vêlages ?

(Travail, Marché, Système d'alimentation, Autres (à préciser))

.....

.....

.....

.....

.....

.....

30. Avez-vous une date de début de mise à la repro et une date de fin ? Pour quels animaux ? Pourquoi ?

.....

.....

.....

.....

.....

.....

31. Par quels moyens détectez-vous les chaleurs de vos animaux ?

.....

.....

.....

32. Synchronisez-vous les chaleurs de vos animaux ? quels animaux ? Quelle proportion ?

Relations entre période de vêlages et conduite des surfaces fourragères : étude dans des élevages laitiers herbagers du Puy-de-Dôme

Relationships between calving period and forage management in grassland based dairy cow systems in Puy-de-Dôme

JACQUOT A.L. (1,2), BLANC F. (1), LACOUR C. (3), BAUMONT R. (2), BRUNSCHWIG G. (1), AGABRIEL C. (1)

(1) Clermont Université, VetAgro Sup, UR EPR 2008.03.102, USC INRA 2005, F-63012 Clermont-Ferrand Cedex 1

(2) INRA, UR 1213 Herbivores, Theix, F-63122 Saint-Genès-Champanelle

(3) EDE 63, 11 allée Pierre de Fermat, F-63171 Aubière

INTRODUCTION

Les exploitations laitières herbagères de montagne doivent faire face à des contraintes physiques importantes qui limitent leur compétitivité sur le marché national. En zone d'AOP (Appellation d'Origine Protégée), l'adhésion à un cahier des charges est une stratégie qui permet d'augmenter la valeur ajoutée de la production. Pour garantir le lien entre produit et terroir, les cahiers des charges, en Auvergne, veulent remettre l'herbe au cœur des systèmes. Ils exigent ainsi un grand degré d'autonomie fourragère à l'échelle de l'exploitation et une utilisation modérée d'aliments concentrés. Une des voies d'amélioration de l'autonomie fourragère et alimentaire est de faire correspondre la dynamique des besoins alimentaires du troupeau avec les périodes de disponibilité herbagère et/ou les possibilités de récolte et de stockage des fourrages.

L'objectif de cette étude est de déterminer dans quelle mesure la conduite des surfaces en herbe est influencée par la répartition annuelle des besoins alimentaires du troupeau, celle-ci étant déterminée par la répartition des vêlages.

1. MATERIEL ET METHODES

Le service du contrôle laitier de l'EDE 63 a constitué un échantillon de 122 exploitations laitières de la zone Saint Nectaire élargie et répondant aux contraintes du cahier des charges de l'AOP : système tout herbe, limitation des concentrés avec moins de 2,1 T par an et par vache, 20 % de renouvellement annuel avec 80 % d'autorenouvellement.

1.1. PROFILS DE REPARTITION DE VELAGES

La répartition des vêlages de chacune de ces 122 exploitations a été analysée sur trois campagnes successives (2006 à 2008). Les 63 exploitations présentant une stabilité interannuelle de la répartition des vêlages ont été retenues puis classées en fonction de la saisonnalité des vêlages. Quatre profils ont ainsi été identifiés : les exploitations présentant des vêlages étalés sur toute l'année (E, n=29), les exploitations présentant des vêlages groupés au printemps (GP, n=5), en été (GE, n=8) ou en automne (GA, n=21).

1.2. PRATIQUES D'UTILISATION DU SYSTEME FOURRAGER

Parmi ces 63 exploitations, 30 ont été enquêtées en novembre 2009. Les enquêtes ont permis de recueillir des données relatives à la gestion du système fourrager : caractéristiques du parcellaire (nombre de parcelles, altitude, surface, fertilisation), calendrier fourrager (dates de mises à l'herbe et de récoltes), calendrier de pâturage (allotement, date d'entrée et de sortie des parcelles), stocks fourragers.

1.3. CONSTITUTION DE L'ECHANTILLON ANALYSE

Lors de ces enquêtes, nous avons vérifié si le profil de répartition des vêlages à partir des données du contrôle laitier était similaire à celui décrit spontanément par l'éleveur (sans visualisation des données) et si celui-ci déclarait souhaiter une telle répartition. Lorsque ces conditions étaient réunies nous avons considéré que la répartition des vêlages rendait compte d'une stratégie de reproduction.

Au final nous avons analysé un échantillon de 17 exploitations satisfaisant les conditions décrites ci-dessus, et présentant des données complètes sur le système fourrager. Elles se répartissent dans 3 groupes de répartition de vêlages (E : n= 6, GE : n=5, GA : n=6).

L'analyse du lien entre stratégie de reproduction et gestion du système fourrager a été menée selon deux démarches. Nous avons tout d'abord étudié l'effet de la stratégie de reproduction sur un ensemble de variables décrivant les stocks fourragers (tonnes de MS récoltées en foin, en ensilage, en enrubannage), les modalités d'utilisation du système fourrager (proportion de la surface uniquement pâturée, uniquement récoltée, récoltée sous forme humide, en sec, récoltée plus d'une fois) et les dates de récolte corrigées de l'effet altitude. Dans un second temps nous avons réalisé une analyse en composantes principales afin de structurer des groupes d'exploitations selon la gestion du système fourrager et de déterminer si ces groupes peuvent être associés à des répartitions de vêlage spécifiques.

2. RESULTATS

Sur les 3 campagnes, la production laitière, l'âge au premier vêlage, le rang de lactation et l'intervalle vêlage – vêlage, n'ont pas été différentes entre les 3 groupes analysés.

De même, les variables décrivant le système fourrager n'ont pas été, pour la plupart, significativement différentes selon ces groupes. Cependant, la part de surface fauchée 2 ou 3 fois parmi les surfaces récoltées a été significativement plus importante pour GE que pour GA. En outre, ces deux groupes ont consacré une surface moins importante que le groupe E à la récolte du foin (Tableau 1).

Tableau 1 : caractéristiques des surfaces selon les groupes de répartition de vêlages

Surfaces en %	E (n=6)	GA (n=6)	GE (n=5)
% des surfaces en herbe			
pâturage exclusif	44 ±12	43 ±22	47 ±9
récolte exclusive	14 ±14	6 ±9	12 ±6
déprimage	10 ±6	10 ±7	7 ±7
% des surfaces récoltées			
1 ^{ère} coupe en foin	59 ±30	34 ±20	36 ±13
2 ou 3 récoltes	72 ±19	62 ±8	87 ±12

La précocité des chantiers de récolte et leur durée ont été très variables entre les exploitations mais, en moyenne, comparable entre les 3 groupes. En revanche, les groupes d'exploitation définis selon la gestion du système fourrager par l'analyse en composantes principales n'ont pas pu être associés à des répartitions de vêlage spécifiques.

DISCUSSION ET CONCLUSION

Nous n'avons pas mis en évidence de liens clairs entre stratégies de reproduction, définies par les répartitions de vêlages voulues par l'éleveur, et les variables que nous avons sélectionnées pour caractériser le système fourrager. Ceci pourrait s'expliquer par le nombre réduit d'exploitations au sein des groupes mais aussi par leur hétérogénéité intragroupe. En effet, par exemple, pour les vêlages « étalés », les éleveurs souhaitaient une telle répartition pour différentes raisons (travail, autonomie fourragère). Ceci pourrait se traduire par des pratiques de gestion du système fourrager différentes au sein d'un même groupe.

Nous tenons à remercier les éleveurs pour leur patience et les étudiants de 3^{ème} année de l'option ESP, VetAgro Sup.

Relations entre période de vèlages et conduite des surfaces fourragères : étude dans des élevages laitiers herbagers du Puy-de-Dôme

JACQUOT A.L. (1,2), BLANC F. (1), LACOUR C. (3), BAUMONT R. (2), BRUNSCHWIG G. (1), AGABRIEL C. (1)

Contexte

Évolution des cahiers des charges AOP d'Auvergne : vers un retour de l'herbe ⇨ Favoriser le lien produit – terroir
 ↳ utilisation modérée des concentrés
 ↳ un plus grand degré d'autonomie fourragère

Hypothèse:

Faire correspondre la dynamique des besoins alimentaires du troupeau avec la dynamique annuelle de production de l'herbe (pâturée et/ou stockée).

Objectif

Identifier le lien entre conduite des surfaces en herbe et répartition annuelle des besoins alimentaires du troupeau ?

MATERIEL ET METHODES

Constitution de l'échantillon

122 exploitations laitières issues de la Base EDE 63 avec:

- Zone de saint-nectaire élargie
- Système tout herbe
- Concentrés : < 2,1 T/VL/an
- Renouvellement : au moins 20%
- Auto renouvellement : au moins 80%

↓ Analyse de la stabilité interannuelle de la répartition des vèlages

63 exploitations : 4 groupes de vèlages

- Étalés (E=29)
- Groupés Printemps (GP=5)
- Groupés Été (GE=8)
- Groupés Automne (GA=21)

↓ Sélection par disponibilité

30 enquêtes en exploitation

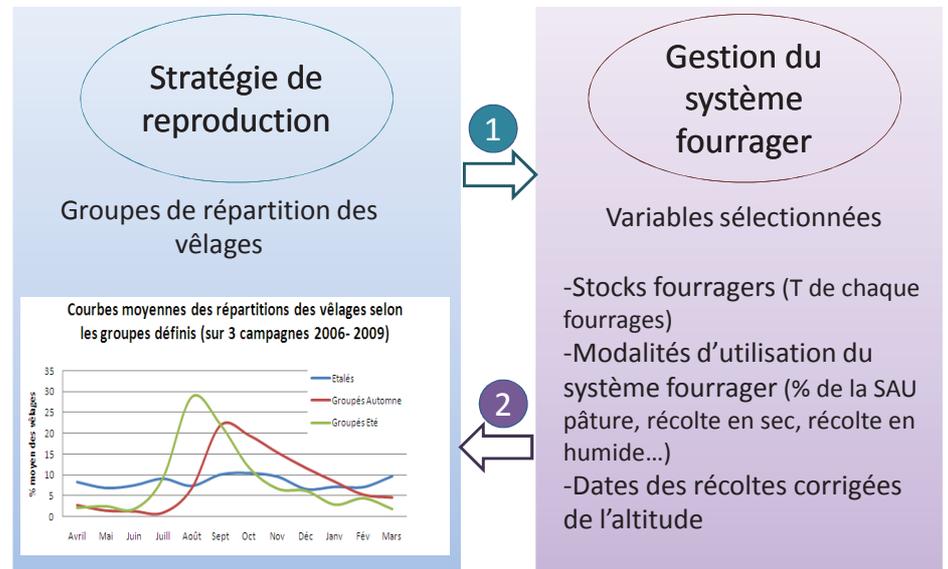
↓ Répartition choisie par l'éleveur vs subie

17 exploitations

- E= 6, GE=5, GA=6

Analyse des interrelations entre stratégie de reproduction et gestion des systèmes fourragers

- 1 Caractérisation des groupes de répartition de vèlages par des variables décrivant la gestion du système fourrager (Analyses de variance)
- 2 Typologie des exploitations selon des variables de gestion du système fourrager et identification des liens avec les groupes de répartition de vèlages (ACP-CAH)



RESULTATS

1 Absence de différences sur les variables zootechniques,

mais

présence d'écarts sur des variables de gestion du système fourrager

	E (n=6)	GA (n=6)	GE (n=5)
Quota/SAU	3531 ±847	3936 ±500	3609 ±727
IVV	390 ±16	398 ±17	396 ±17
Age 1 ^{er} vèlage	34 ±3	32 ±3	35 ±1

Variables zootechniques:
comparaison des groupes de vèlages avec des variables du système de production

2 Absence d'association significative entre les groupes de gestion du système fourrager et les groupes de répartition des vèlages

1

Surfaces en %	E (n=6)	GA (n=6)	GE (n=5)
% des surfaces en herbe			
pâture exclusive	44 ±12	43 ±22	47 ±9
récolte exclusive	14 ±14	6 ±9	12 ±6
déprimage	10 ±6	10 ±7	7 ±7
% des surfaces récoltées			
1 ^{er} coupe en foin	59 ±30	34 ±20	36 ±13
2 ou 3 récoltes	72 ±19	62 ±8	87 ±12

Variables système fourrager:
caractéristiques des surfaces selon les groupes de répartition de vèlages (en rouge : résultat significatif)

CONCLUSION ET DISCUSSION

Absence de liens clairs établis entre stratégie de reproduction et les variables caractérisant le système fourrager

↳ Nombre trop réduit d'exploitations au sein des groupes de répartition de vèlage (trop grande **hétérogénéité intragroupe**)

↳ Au sein d'un même groupe de répartition des vèlages, les motivations pour cette répartition sont différentes selon les éleveurs et expliqueraient la variabilité de gestion du système fourrager



VetAgro Sup
Complémentarité de Clermont



Dynamilk : un simulateur pour étudier les compromis entre performances animales, utilisation des ressources herbagères et recherche d'autonomie alimentaire dans les systèmes bovins laitiers de montagne

Les systèmes d'élevages laitiers herbagers montagnards sont d'autant plus sensibles aux changements de contraintes de production (types de fourrages et niveaux d'aliments concentrés autorisés dans les cahiers des charges AOP par exemple) et aux aléas climatiques que le milieu est contraignant et que le système fourrager repose sur l'utilisation exclusive de prairies permanentes. Une meilleure adéquation entre les dynamiques de besoins des animaux et d'offre herbagère permettrait à ces systèmes d'atteindre un meilleur degré d'autonomie fourragère et alimentaire, et d'être ainsi plus robustes face aux changements.

Pour explorer des stratégies contrastées de conduite et comprendre les compromis qu'il est possible d'atteindre entre niveau de production, autonomie fourragère et utilisation durable des prairies, un modèle de simulation déterministe à l'échelle de l'exploitation a été construit, nommé Dynamilk. Ce modèle simule les interrelations entre le troupeau laitier, les ressources alimentaires et herbagères et la conduite du système. Dynamilk est composé de deux sous-modèles biotechniques avec, d'une part, le parcellaire comportant un module de croissance de l'herbe prenant en compte la diversité botanique des prairies, et d'autre part, le troupeau laitier. Un modèle de structure démographique du troupeau simule les différentes catégories d'animaux selon leur âge et leur stade physiologique, et, un modèle dynamique simule l'ingestion et la production pour chaque catégorie d'animaux. La production laitière résulte des besoins énergétiques, de l'énergie offerte par la ration et de la capacité des animaux à mobiliser ou reconstituer leurs réserves corporelles. Le modèle de conduite est composé des éléments stratégiques définissant les objectifs de production et les règles de pilotage des principales pratiques (constitution et gestion des fourrages, alimentation et pâturage du troupeau). Le modèle animal et le modèle global ont été validés sur des données expérimentales ou de référentiels de fonctionnement d'exploitations. Ces deux modèles présentent des résultats et un fonctionnement cohérent.

Dynamilk a permis de tester deux systèmes contrastés selon leur dynamique annuelle de production (période des vêlages « groupés de septembre à février » (GA) vs « groupés de mars à mai » (GP)) à chargement (0,94 UGB/ha) et apports de concentrés (1 200 kg/VL/an) identiques. Dans un plan d'expérience virtuel, chaque système a été simulé sur deux séries climatiques, une sans aléa climatique (1993-1999) et l'autre avec (2005-2011), avec une augmentation du chargement et une diminution des apports de concentrés. Les résultats de simulation montrent qu'à faible chargement les deux systèmes sont autonomes pour les fourrages et sous-utilisent les ressources herbagères au pâturage. L'augmentation du chargement améliore l'utilisation de l'herbe pâturée sans pénaliser les performances laitières, mais réduit l'autonomie en fourrages récoltés. Diminuer les apports de concentrés améliore également l'utilisation de l'herbe, mais réduit la production laitière. La production laitière du système GA est plus sensible que celle du système GP à la qualité des fourrages récoltés qui varie selon les années climatiques. Ainsi le système GP, grâce à plus d'utilisation de l'herbe pâturée, serait moins sensible aux aléas.

Dynamilk permet d'analyser la réponse de systèmes laitiers herbagers sur des séries climatiques longues et de tester pas à pas des modifications de structure et de pilotage du système dans une démarche de conception de systèmes *ex ante*.

Mots-clés : système d'élevage, modélisation, simulateur, bovin laitier, système fourrager, autonomie alimentaire, prairies permanentes, montagne.

Dynamilk: a farming system model to explore the trade-offs between animal performances, forage utilization and feed self-sufficiency in dairy cattle mountainous systems

Dairy systems based on grasslands are sensitive towards environmental variations (climatic events) and production constraints changes. A better match between dynamic of dairy cattle needs and herbage supply could enable the farming system to lean towards a better forage self-sufficiency at farm-scale and to be more resilient to changes.

Modeling approach is used to study, over many years, several scenarios with contrasted strategies of biotechnical subsystems management in order to test different calving distributions, cattle and grasslands characteristics, or practices on pastures and meadows. Such a dynamic model, called Dynamilk, has been created and implemented. Dynamilk is focused on relationships among dairy cattle, management and resources. This model is based on a bio-technical approach focused on grassland use by animals. Grassland sub model which consists in biodiversity characteristics and grass growth components has been developed by Jouven (2006). Dairy cattle sub model consists in 2 units: demographic structure unit and intake, milk production and body reserve use unit. This model considers calving period and distribution, dairy cattle characteristics (ability of animals to produce milk and use its body reserve) in order to test the match between animal needs and feed supply. Milk production according to herbage and feed supply is the main output of Dynamilk. Decisional sub-system describe the main practices to rule the production system which are forage system management with mowing practices, forage stores, winter diet, concentrate distribution and grazing management. Validation of dairy cattle sub model and whole model has been carried out by comparison against experimental data and case-study data of real farms.

Two systems has been simulated with Dynamilk, the first one based on calving distribution from august to february, called GA, and the second one from march to june, called GP (stocking rate 0.94 LU.ha⁻¹ and concentrate amount 1200 kg.cow⁻¹.year⁻¹). Simulation results have pointed out that both system achieved forage self-sufficiency and grass offer is underused. Several simulations has been accomplished to evaluate impacts of stocking rate increase and concentrate decrease on animal production, herbage utilisation and forage self-sufficiency rate. The simulation have indicated that matching animal needs with feed and herbage supply to better cope with climatic events and constraints changes.

Key words : farming system, modeling, simulator, dairy cattle, forage system, feed self-sufficiency, permanent grasslands, mountain.

