

## LE MODELE ORFEE ET SON ADAPTATION A LA QUESTION DE RECHERCHE

### 1. Modèle Orfee (Optimization of Ruminant Farm for Economic and Environmental assessment)

#### 1.1 Description globale

Le modèle bioéconomique Orfee (Optimization of Ruminant Farm for Economic and Environmental assessment) (Mosnier *et al.*, 2017) est un modèle de simulation élaboré pour explorer les systèmes d'élevages associant la production de cultures de rente en France. S'inscrivant dans la lignée d'autres modèles d'élevage tels que Opt'INRA (modèle utilisé en élevage avec pour fonction première la maximisation des bénéfices des exploitations simulées et renfermant 275 activités liées et limitées par 217 contraintes) (Veysset *et al.*, 2005) et FSSIM (Louhichi *et al.*, 2010). Il est utilisé pour optimiser les décisions relatives à la production agricole et herbagère, la production animale, les bâtiments et les matériaux, la composition des rations, l'utilisation des prairies et l'achat d'aliments. Le modèle maximise une fonction objective du type espérance-variance. La fonction objective (espérance du résultat courant net) est constituée par le total des revenus, y compris les ventes d'animaux (lait, carcasses, animaux maigres) et les paiements compensatoires (paiements découplés, paiements à la vache allaitante...) moins les coûts liés aux troupeaux, à la mécanisation (coûts de carburant, d'amortissement et de maintenance ou les coûts d'entreprise) et les bâtiments (amortissement et maintenance) (Mosnier *et al.*, 2017). Le résultat courant net choisi comme objectif est un indicateur pertinent pour mesurer la rentabilité et l'efficience d'une exploitation. L'optimisation est réalisée sous une série de contraintes concernant l'alimentation des animaux, la démographie du troupeau, les opérations agricoles, la mécanisation, l'utilisation de l'espace, les ressources agricoles, les politiques et les processus biotechniques et biologiques liés aux animaux (Mosnier *et al.*, 2017). Le modèle intègre diverses productions animales (bovins laitiers, bovins allaitants et ovins) repartis en différentes catégories. Les alternatives de production concernent les races car elles ont un impact sur les caractéristiques des animaux (poids vif et poids des carcasses, capacité d'ingestion, performances de reproduction, production de lait...). Différentes périodes de vêlage sont possibles afin de contrôler la mortalité des veaux ou de mieux adapter les besoins en aliments ou en main-d'œuvre aux disponibilités en pâturages ou en main-d'œuvre. Les besoins en aliments

pour animaux sont exprimés chaque mois en termes d'énergie, de protéines et de capacité d'ingestion, afin de pouvoir adapter les rations aux contextes de production et de réglementation. Les opérations (distribution des aliments, traite, surveillance de la reproduction...) et les besoins en logement sont également spécifiés et ont un impact direct sur les besoins en main-d'œuvre. Les contraintes démographiques entre les catégories animales annuelles permettent de modéliser les processus de reproduction et de vieillissement. Pour couvrir les principales productions agricoles des systèmes étudiés ainsi que les cultures susceptibles d'améliorer l'autosuffisance alimentaire animale, des cultures dont graminées temporaires et permanentes) sont introduites avec diverses utilisations finales (ensilage, grain, nombre de coupes d'herbe...). L'accent a été mis sur la fourniture d'alternatives de production pour réduire la fertilisation, la protection des plantes et la consommation de carburant. La superficie cultivée est limitée par la superficie agricole utilisable de la ferme et par la superficie pouvant être labourée. Les opérations de culture peuvent être mises en œuvre grâce à différents types de machines. Le type de matériel de traite et de distribution d'aliments est paramétré par l'opérateur. Ils affectent le travail requis pour les différentes opérations du troupeau, contraignent l'alimentation et modifient les coûts de la machine et la consommation de carburant. Les exigences en matière de logement et de construction dépendent du nombre d'animaux et de la production de déjections. Les coûts sont proportionnels à leur capacité et à leurs caractéristiques (stabulation libre, cabine et type de fosse à fumier). Toutefois il s'agit d'un modèle d'optimisation pseudo dynamique, il est globalement statique avec des calculs intermédiaires prenant en compte des pas de temps mensuel pour l'élaboration des bilans. Le modèle est implémenté sous la plateforme de modélisation mathématique GAMS (General Algebraic Modeling System). Il s'agit d'une plateforme de modélisation mathématique permettant la description synthétique de modèles complexes (McCarl *et al.*, 2004).

### **1.1.1 Activités animales et principaux produits**

Les types d'animaux sont caractérisés par la race (les races laitières (prim'Hostein, montbéliarde, normande) ou les races allaitantes (charolaise, limousine, salers, aubrac, blonde d'Aquitaine), l'objectif de production (âge au premier vêlage) ou type de produit animal ciblé, le niveau de la production laitière et la période de vêlage des femelles reproductrices.

**Croissance animale :** Deux courbes de croissance animale sont construites pour les deux races principales (charolais et prim'Hostein). Il existe également une alternance entre les taux de croissance moyens hivernaux et printaniers, surtout pour les génisses âgées de 3 ans au vêlage qui ont un taux de croissance moyen plus faible en hiver et mobilisent une croissance compensatoire au printemps. Le poids vif des vaches matures par défaut est défini selon les statistiques nationales de 2014 utilisées par (Agabriel *et al.*, 2015) : charolais 700 kg, salers 613 kg, prim'Hostein de 645 kg, le montbéliarde 635 kg.

**Production de lait :** La production de lait est définie par mois en fonction de la production laitière moyenne par jour et de l'équation de Wood (Wood, 1967) qui permet de spécifier la distribution du lait par mois. L'équation de Wood estime la quantité de lait produite en fonction de la semaine de lactation. On a un potentiel laitier de 8 L / jour pour les charolaises, 9 L / j pour les salers, 7 L / jour pour les limousines. Pour les vaches laitières selon (Agabriel *et al.*, 2015), le potentiel laitier est basé sur la lactation standard (305j).

**Tableau 1.** Lactation standard selon la composition de la race et du lait.

	Lactation Standard	Teneur en matières grasses (%)	Teneur en protéines (%)
Prim'Hostein	8000	38.7	31.3
montbéliarde	6500	38.6	32.4

**Source:** milk recording, 2012<sup>1</sup>

La production laitière augmente avec le nombre de lactations jusqu'à la cinquième lactation. Cependant, l'effet n'est pris en compte que pour les vaches primipares. Les primipares qui vêlent pour la première fois à 3 ans produisent 83% de leur potentiel de maturité, celles vêlant à 30 mois 75% et celles âgées de 2 ans 71%.

<sup>1</sup><http://www.web-agri.fr/conduite-elevage/genetique-race/article/des-performances-en-hausse-pour-des-effectifs-en-baisse-1175-89367.html>

### 1.1.2 Démographie des troupeaux

La mortalité n'est appliquée qu'aux veaux. Les valeurs par défaut sont fournies par race et sont modulées en fonction de la période de vêlage (Perrin *et al.*, 2011). La prolifération est estimée en fonction de la fréquence des jumeaux enregistrés (Ledos and Moureaux, 2013) : prim'Holstein 1,034 ; normande 1,035 ; montbéliarde 1,041 ; charolaise 1,048 ; limousine 1.016 ; saler 1,024. Le taux de réforme minimum par défaut est proposé en fonction des pratiques actuelles observées dans les fermes : prim'Holstein 0,35 ; normande 0,25 ; montbéliarde 0,25 ; charolaise 0,23 ; limousine 0,23 ; saler 0,14.

### 1.1.3 Alimentation

**Les exigences alimentaires** : les besoins en aliments, la consommation d'aliments et la valeur des aliments sont calculés selon la méthodologie Inra (Brocard, 2010). Les exigences et le contenu des aliments ont deux valeurs pour caractériser la teneur en protéines : PDIE (protéines digestibles par l'intestin grêle grâce au contenu énergétique des aliments) et PDIN (Protéines Digestibles par l'Intestin grêle grâce à la teneur en azote des aliments pour animaux).

Les besoins totaux des animaux en protéines et en énergie sont calculés comme la somme des besoins en entretien et en croissance pendant la gestation et la production de lait.

**La capacité d'ingestion** est calculée pour chaque activité animale, sur une base mensuelle. Elle augmente avec le poids vif des animaux, la production de lait et l'activité physique, et diminue au cours du dernier stade de la gestion. Quatre blocs d'équations différents sont introduits pour la vache laitière, la vache allaitante, les veaux qui s'allaitent et pour les autres animaux.

### 1.1.4 La fonction objective : Le résultat courant

La fonction objective dans Orfee (le résultat courant net) renvoie à une méthode de calcul d'un ratio comptable. Il se calcule à partir du résultat d'exploitation et du résultat financier. Il est constitué par la somme des produits d'exploitations et des produits financiers auxquels on soustrait la somme des charges d'exploitation et des charges financières. Il s'agit d'un indicateur pertinent permettant de mesurer la rentabilité de l'exploitation. Dans notre modèle la fonction objective est représentée comme suit :

*Résultat courant = marge brute – (salaires + taxes)*

*Marge brute = (produit total) – (charges opérationnelles + charges structurelles)*

*Produit total = revenus issus des produits (lait, viande, cultures) + aides et subventions*

### 1.1.5 Quelques contraintes d'optimisation

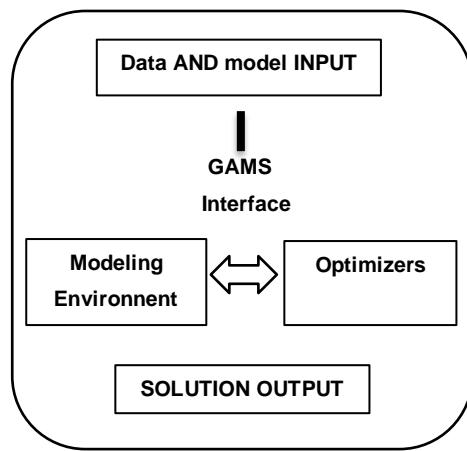
Il existe des centaines de contraintes dans le modèle, quelques-unes sont traduites ci-après :

- Les différentes vaches reproductrices peuvent produire différents types de veaux mâles, mais la somme des vêlages de mâles = somme des veaux mâles,
- Le taux minimum de vaches de réforme est défini en fonction du nombre de femelles qui vêlent au cours de l'année,
- La consommation alimentaire ne peut pas dépasser la capacité d'ingestion de l'animal,
- La quantité d'herbe fraîche disponible ne peut pas être retardée d'un mois sur l'autre,
- Les vaches laitières ne peuvent pas pâturer les pâturages situés trop loin de la salle de traite,
- La quantité d'herbe que les vaches laitières peuvent pâturer ne peut pas dépasser le nombre d'hectares qui leur sont accessibles, multiplié par la production de pâturage.

## 1.2 Implémentation

Le modèle Orfee est implémenté sous la plateforme de modélisation mathématique GAMS (General Algebraic Modeling System) (McCarl *et al.*, 2004). Il s'agit d'une plateforme de modélisation mathématique conçue pour fournir un langage structuré pour la description synthétique de modèles complexes et de grandes tailles (McCarl *et al.*, 2004). Cet outil permet la modification de modèle préexistant par l'introduction d'un nouvel algorithme de façon sécurisée. Le principe consiste à utiliser la définition univoque de relations algébriques indépendantes des algorithmes de résolution utilisés. La plateforme de modélisation a la particularité d'avoir son environnement de modélisation et sa bibliothèque d'optimisation conçus indépendamment. GAMS est un outil puissant pour résoudre des problèmes d'optimisation. Le codage dans GAMS est

relativement simple et peut gérer des problèmes d'optimisation avec différentes structures. Le système de modélisation algébrique générale (GAMS) est un système de modélisation de haut niveau pour l'optimisation mathématique. GAMS est conçu pour modéliser et résoudre des problèmes d'optimisation linéaires, non linéaires et en nombres entiers mixtes. Le système est adapté aux applications de modélisation complexes à grande échelle et permet à l'utilisateur de créer des modèles pouvant être adaptés à de nouvelles situations. Le système est disponible pour être utilisé sur diverses plates-formes informatiques. Les modèles sont portables d'une plateforme à l'autre. Il s'agit du premier langage de modélisation algébrique (AML). Avec un environnement de développement intégré (IDE), GAMS est connecté à un groupe de solveurs d'optimisation indépendant. On trouve les solveurs BARON, COIN-OR, CONOPT, CPLEX, DICOPT, Gurobi, MOSEK, SNOPT, SULUM et XPRESS (McCarl *et al.*, 2004). Il est doté de nombreux avantages et ses propriétés confortent le choix dans notre thèse de partir d'un modèle préexistant à savoir Orfee (Optimization of Ruminant Farm for Economic and Environmental assessment) (Mosnier *et al.*, 2017).

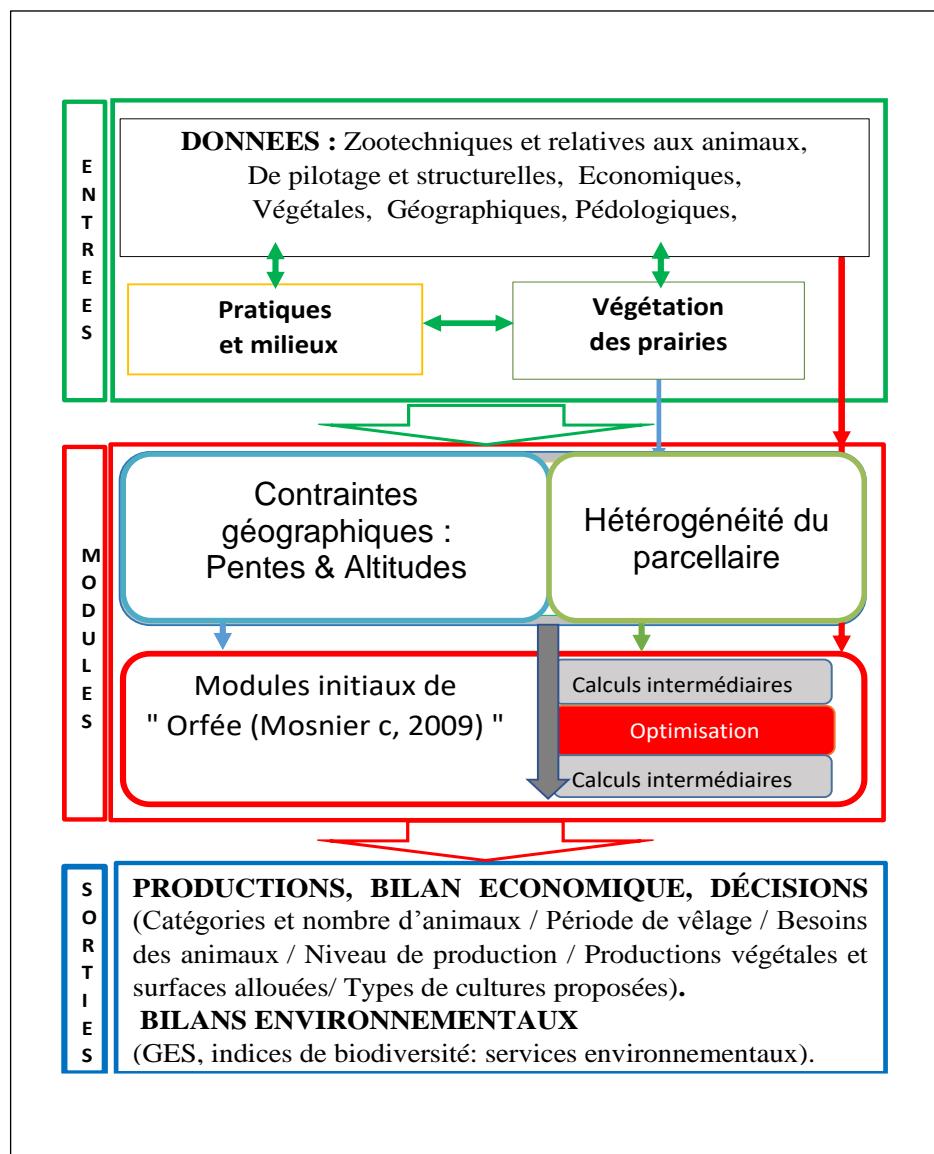


**Figure- 1.** Schéma de fonctionnement de GAMS (Source : (McCarl *et al.*, 2004)).

GAMS permet également la modification de modèle préexistant, nous avons exploité la possibilité d'adapter finement le modèle de base à notre cadre d'étude. Orfee a ainsi été adapté pour prendre en compte les particularités des zones de montagnes.

## 2. Adaptation du modèle support pour traiter les questions abordées

On prend en compte la géographie et la constitution du couvert végétale. On sera ainsi en mesure de déterminer l'utilisation des prairies et les utilisations des parcelles (Fleury *et al.*, 1996; Andrieu *et al.*, 2007).



**Figure- 2.** Concept d'adaptation du modèle support.

### 2.1 Intégration de l'hétérogénéité du parcellaire

La représentation de la production des prairies a été enrichie à partir de la typologie nationale des prairies permanentes afin d'offrir au modèle une hétérogénéité du parcellaire. Nous nous sommes appuyé sur la méthode de calcul développée dans le

manuel intitulé prairies permanentes, et des références pour valoriser leur diversité (Launay *et al.*, 2011).

### **2.1.1 Les types de prairie pour représenter les zones de montagne**

Les types de prairie considérés pour représenter les zones de montagne sont les végétations de prairies caractéristiques la zone d'étude et référencés dans la typologie nationale des prairies permanentes (Launay *et al.*, 2011) :

**PA1** : Pâtures d'altitude sèches et acides à fétuque rouge et agrostide (Prairie de diversité et phénologie tardive : Productivité et valeur alimentaire faible à moyenne, mais relativement stable dans la saison).

**PA2** : Prairies mixtes d'altitude peu fertilisées à flouve odorante et fétuque rouge (Prairie de composition équilibrée : productivité moyenne et valeur alimentaire élevée surtout pour les repousses).

**PA3** : Pâtures mixtes d'altitude bien fertilisées à ray-grass anglais et dactyle (Prairie de phénologie précoce, équilibrée en famille botaniques : Forte productivité et valeur alimentaire élevée surtout pour les repousses).

**PA4** : Prairies mixtes d'altitude à pâturin commun et ray-grass anglais (Prairies de phénologie précoce, pauvre en légumineuses : Productivité très élevée. Valeur alimentaire élevée, mais diminue très vite au printemps).

**PA5** : Pâtures d'altitude fauchées ou peu pâturées à flouve odorante et pâturin commun (Prairie de phénologie moyennement précoce, pauvre en légumineuses. Productivité moyenne : Valeur alimentaire élevée au printemps et moyenne pour la repousse).

**Source** : prairies permanentes, des références pour valoriser leur diversité (Launay *et al.*, 2011)

### **2.1.2 Les valeurs alimentaires**

Les quantités de biomasse produite et les différentes valeurs alimentaires des prairies sont notamment les suivantes : UFL (Unité Fourragère Lait), UFV (Unité Fourragère Viande), PDIA (Protéines vraies réellement Digestibles dans l'Intestin, d'origine Alimentaire), UEB (Unité d'Encombrement Bovin), UEL (Unité d'Encombrement Lait), PDIN, PDIE mensuelles déterminées en fonction des sommes de températures, des

pratiques et des types de praires sont intégrés dans le modèle. Nous avons déterminé pour les 5 types de praires d'altitude les différentes valeurs alimentaires pour les quatre itinéraires techniques considérés dans nos travaux.

### 2.1.3 Les itinéraires techniques (ITK\*)

Il s'agit de quatre itinéraires techniques couramment utilisés en polyculture élevage dans la zone d'étude (Massif Central, France) :

ITK<sup>2</sup> 1 : Pâturage toute l'année (avril - octobre)

ITK 2 : Fauche fin de printemps (foin réalisé fin juin) + pâturage été et automne

ITK 3 : Fauche printemps (ensilage ou enrubanne fin mai) + pâturage été et automne

ITK 4 : Fauche printemps (ensilage ou enrubanne fin mai) + fauche été (regain)

+ pâturage automne

### 2.1.4 Intégration d'éléments relatifs aux différents types de prairie

Les quantités de biomasse en Kilogramme de Matière Sèche à l'Hectare (kg MS (Herbe) /ha) et les valeurs alimentaires UFL, UFV, PDIA, PDIN, PDIE, UEM, UEB, UEL (kg de MS) sont déterminées en fonction des sommes de températures journalières exprimées en degré Celsius jour (°Cj) à une altitude de 900m (altitude moyenne des exploitations considérées pour l'étude à travers les cas-types), des différentes pratiques (ITK\*), des types de praires d'altitude (PA\*). On considère les 5 types de praires d'altitude de la typologie nationale (PA1, PA2, PA3, PA4 et PA5) et les quatre itinéraires techniques considérés (ITK1, ITK2, ITK3 et ITK4). Les calculs de bases sont faits sur 4 périodes de l'année à savoir **Fin avril** pour les valeurs ajoutées pour une somme de température de 580°CJ, **Fin juin** pour les valeurs ajustées pour une somme de température de 1180°C, **Début août** pour les repousses de 6 semaines et **Mi-septembre** pour les repousses de 7 semaines en s'appuyant à la lettre sur la méthodologie de calcul de la typologie nationale des prairies permanentes (Tableau 2). On utilise les coefficients de croissance printanière des types de prairie pour calculer les quantités de MS/ha/100°Cj à l'altitude de 900m (Tableau 4). Les valeurs alimentaires sont déterminées en fonction de la biomasse disponible et de la

---

<sup>2</sup> Itinéraire Technique

période à dire d'expert (René BAUMONT "UMRH INRA"). Les quantités de biomasse en TMS et les valeurs alimentaires sont données pour les 5 types de prairies d'altitudes dans la typologie nationales à partir du repère saisonnier correspondant à 4 mesures et prélèvements réalisés chaque année.

- **Récapitulatif des périodes considérées pour les calculs de productions en herbe et valeurs alimentaires correspondantes**

**Fin avril** : valeurs ajustées pour une somme de température de 580°Cj

**Fin juin** : valeurs ajustées pour une somme de température de 1180°C

**Début août** : repousse 6 semaines

**Mi-septembre** : repousse 7 semaines

**Tableau 2.** Quantités de biomasse et des valeurs alimentaires par période.

	Deb Printemps	Fin printemps	Eté	Automne
	Mi-mai	Fin juin	Début août	Fin Sept.
	500 à 600°Cj	1050 -1150°Cj	6 semaines	7 semaines
Fourrage (kg MS/ha)	1882	4927	1099	831
UFL (/kg MS)	0,97 ± 0,05	0,76 ± 0,05	0,92 ± 0,07	0,94 ± 0,06
UFV (/kg MS)	0,92 ± 0,06	0,68 ± 0,06	0,86 ± 0,08	0,89 ± 0,07
PDIA (/kg MS)	43	28	49	51
PDIN (/kg MS)	116 ± 13	62 ± 16	116 ± 16	124 ± 19
PDIE (/kg MS)	102 ± 5	78 ± 6	105 ± 8	108 ± 7
UEB (/kg MS)	0,96 ± 0,04	1,14 ± 0,05	0,97 ± 0,05	0,94 ± 0,05
UEL (/kg MS)	0,97 ± 0,02	1,08 ± 0,03	0,98 ± 0,03	0,96 ± 0,03

**Source** : Prairies permanentes, des références pour valoriser leur diversité "page 22 au 23" (Launay *et al.*, 2011)

#### 2.1.4.1 Croissance printanière des 5 types de prairies d'altitude

**Tableau 3.** Sommes de température mensuelle à 900m d'altitude.

Périodes	Mars	Avril	Mai	Juin
Sommes des températures en °Cj	151	224	366	479

**Tableau 4.** Croissance printanière des 5 types de prairies d'altitude.

Type de prairie	PA1	PA2	PA3	PA4	PA5
Croissance (Kg de MS /ha/100°Cj)	373	508	534	608	449

**Source :** Prairies permanentes, des références pour valoriser leur diversité "page 102" (Launay *et al.*, 2011)

**2.1.4.2 Biomasses et des valeurs alimentaires pour Itinéraire technique à pâturage exclusif (ITK1) sur des prairies mixtes d'altitude peu fertilisées à flouve odorante et fétuque rouge (PA2).**

Nous avons bénéficié pour nos calculs de l'appui d'un auteur de l'ouvrage en question. Ce dernier s'avère l'un des directeurs de la thèse (René BAUMONT "UMRH INRA").

**Tableau 5.** Production de biomasse et valeurs alimentaires pour la prairie de type PA2 en pâturage exclusif (ITK1).

	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Total
Herbe (kg MS/ha)	1217	2324	1825	733	733	475	356	7663
UFL (/kg MS)	1,0185	0,97	0,873	0,92	0,92	0,94	0,94	
UFV (/kg MS)	0,966	0,92	0,828	0,86	0,86	0,89	0,89	
PDIA (/kg MS)	45,15	43	38,7	49	49	51	51	
PDIN (/kg MS)	121,8	116	104,4	116	116	124	124	
PDIE (/kg MS)	107,1	102	91,8	105	105	108	108	
UEM (/kg MS)	0,893	0,94	1,034	0,97	0,97	0,92	0,92	
UEB (/kg MS)	0,912	0,96	1,056	0,97	0,97	0,94	0,94	
UEL (/kg MS)	0,9215	0,97	1,067	0,98	0,98	0,96	0,96	

**Productions d'herbe de Juillet, Août, Septembre et Octobre**

Les productions des mois de juillet, août, septembre et octobre sont déterminées au prorata des nombres de semaine. Les valeurs alimentaires de l'herbe en avril sont égales aux valeurs alimentaires de l'herbe de mi-mai augmentée de 5% car les productions sont légèrement meilleures à cette période. Les valeurs alimentaires de l'herbe en mai sont égales aux valeurs alimentaires de l'herbe de mi-mai. Les valeurs alimentaires de l'herbe en juin sont égales aux valeurs alimentaires de l'herbe de mi-mai diminuées de 10% car les productions sont moins bonnes en cette période.

Les valeurs alimentaires de l'herbe en juillet sont égales aux valeurs alimentaires de l'herbe en été. Les valeurs alimentaires de l'herbe en septembre sont égales aux valeurs alimentaires de l'herbe d'automne (Tableau 5).

### **Estimations des quantités de Biomasse pour la prairie de type PA2 en pâturage exclusif (ITK1)**

- 580°Cj correspondent à 1882kg MS/ha et une somme de température. On considère les sommes de température de mars et d'avril soit 375°Cj au total Production d'herbe en avril est  $(375^{\circ}\text{Cj} * 1882 \text{ kg MS/ha}) / 580^{\circ}\text{Cj} = 1217 \text{ kg MS/ha}$
- Au mois de mai on a une somme de température de 366°Cj, étant donné que les rendements sont importants durant ce mois. On estime ainsi la croissance à 635 kg MS/ ha/100°Cj au lieu de 508 MS/ ha/100°Cj D'où une augmentation d'herbe en mai de :  $(366^{\circ}\text{Cj} * 635 \text{ kg MS/ ha/100}^{\circ}\text{Cj}) / 100^{\circ}\text{Cj} = 2324 \text{ kg MS/ha}$ .
- On détermine la production du mois de juin en considérant que les rendements sont bas comparés à ceux du mois du mois d'août. On estime ainsi la croissance en kg de MS/ ha/100°Cj à 381 kg MS/ ha/100°Cj au lieu de 508 MS/ ha/100°Cj : D'où une augmentation d'herbe de  $(479^{\circ}\text{Cj} * 381 \text{ kg MS/ ha/100}^{\circ}\text{Cj}) / 100^{\circ}\text{Cj} = 1825 \text{ kg MS/ha}$
- Pour les mois de l'été et du printemps on détermine des quantités au prorata des nombres de semaine que durent le mois. La production d'herbe en juillet (1099 kg MS/ ha) est  $(4 * \text{production d'herbe en été}) / 6 = 733 \text{ kg MS/ha}$ .

### **Valeurs alimentaires pour la prairie de type PA2 en pâturage exclusif (ITK1)**

- Valeur d'herbe avril =Valeur de l'herbe de mi-mai + 5%
- Valeur d'herbe mai =Valeur de l'herbe de mi-mai
- Valeur d'herbe juin =Valeur de l'herbe de mi-mai - 10%
- Valeur d'herbe juillet =valeur de l'herbe été
- Valeur d'herbe aout =valeur de l'herbe été
- Valeur d'herbe septembre =valeur herbe automne
- Valeur d'herbe octobre =valeur herbe automne

### 2.1.4.3 Biomasses et des valeurs alimentaires pour Itinéraire fauche fin de printemps + pâturage été et automne (ITK2) sur des prairies mixtes d'altitude peu fertilisées à flouve odorante et fétuque rouge (PA2).

On considère la quantité d'herbe récolté en juin égale à 80% de la production d'herbe en été avec des productions d'herbe en été et au printemps qui ne changent pas pour les mois d'août, septembre, octobre. Les calculs sont les mêmes pour les différentes prairies d'altitude. La valeur alimentaire du foin est déterminée en multipliant les valeurs alimentaires de la biomasse par le coefficient correspondant au foin fané sol à savoir 0.83. Ce coefficient correspond à celui d'un foin séché d'un sol qui a été arrosé par la pluie il y a moins de 10 jours ((Cf. page 105 Typologie des prairies permanentes française), (Launay *et al.*, 2011)). Cela Peut changer en fonction des caractéristiques du sol, cf. page 105 de la typologie ((Typologie des prairies permanentes française), (Launay *et al.*, 2011)).

**Tableau 6.** Production de biomasse et valeurs alimentaires pour la prairie de type PA2 en fauche fin de printemps (foin réalisé fin juin) + pâturage été et automne (ITK2).

	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Total
Herbe (kg MS/ha)	0	0,00	3941,96	0	732,67	474,88	356,16	5506
UFL (/kg MS)			0,66		0,92	0,94	0,94	
UFV (/kg MS)			0,56		0,86	0,89	0,89	
PDIA (/kg MS)			25,76		49,00	51,00	51,00	
PDIN (/kg MS)			57,04		116,00	124,00	124,00	
PDIE (/kg MS)			75,66		105,00	108,00	108,00	
UEM (/kg MS)			1,52		0,97	0,92	0,92	
UEB (/kg MS)			1,20		0,97	0,94	0,94	
UEL (/kg MS)			1,17		0,98	0,96	0,96	

### 2.1.4.4 Tableau de valeurs de productions de biomasse et alimentaires

Après détermination de la quantité d'herbe et des valeurs alimentaires pour chaque combinaison d'itinéraire technique et type de prairie soit (20 combinaisons) on obtient le tableau (Tableau 7) ci-après qui est intégré dans le modèle Orfee pour permettre la prise en compte des types de prairies au niveau des ensembles définis dans le modèle.

On intègre les valeurs fourragères en fonction des ITK\* et des types des prairies permanentes du Massif central dans un pré-modèle (fichier Excel intégrant les entrées du modèle) et dans le modèle implémenté sur GAMS. Les valeurs du tableau 7 sont utilisées pour les calculs relatifs à l'alimentation des animaux par l'herbe pour renseigner les différentes entités (types de culture et valorisation, valeurs alimentaire, Itinéraires techniques...) dans les ensembles et équations.

**Tableau 7.** Valeurs alimentaires de l'ensilage et du foin (/Kg MS).

	UFL	UFV	PDIN	PDIE	UEB	UEL	UEM	MS	MO
Ensilage_PA2	0.83	0.76	93.96	84.80	1.05	1.03	1.27	0.202	906
Foin_PA2	0.66	0.56	57.04	75.66	1.20	1.17	1.52	0.850	920
Foin_PA1	0.68	0.65	59.80	77.60	1.18	1.16	1.47	0.850	920
Ensilage_PA1	0.80	0.72	87.32	82.79	1.05	1.04	1.28	0.202	906
Ensilage_PA3	0.82	0.74	85.93	82.47	1.06	1.04	1.30	0.202	906
Foin_PA3	0.66	0.56	57.79	74.93	1.20	1.16	1.52	0.850	920
Ensilage_PA4	0.82	0.75	89.86	82.84	1.08	1.05	1.33	0.202	906
Foin_PA4	0.63	0.53	47.84	69.84	1.26	1.20	1.64	0.850	920
Ensilage_PA5	0.82	0.75	89.39	84.08	1.05	1.04	1.29	0.202	906
Foin_PA5	0.66	0.56	55.20	74.69	1.22	1.18	1.55	0.850	920
Regain_PA1	0.77	0.69	93.12	85.54	1.06	1.04	1.29	0.850	920
Regain_PA2	0.86	0.78	112.52	95.55	0.99	1.00	1.19	0.850	920
Regain_PA3	0.86	0.80	115.52	97.05	0.98	1.00	1.18	0.850	920
Regain_PA4	0.86	0.79	110.58	95.55	1.00	1.01	1.21	0.850	920
Regain_PA5	0.81	0.74	93.12	87.36	1.05	1.04	1.28	0.850	920

**Tableau 8.** Présentation des valeurs alimentaires de l'ensilage et du foin (/kg MS) dans le pré modèle de l'outil d'évaluation Orfee. Les lignes P1 à P12 correspondent aux différents mois de l'année partant de janvier (P1) à décembre (P12).

			P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	Producti
Montagne	PA1	paturage	Herbe_PA1				8,16	17,06	13,40	3,71	3,71	2,23	1,67		49,94
Montagne	PA1	1C_foin	Foin_PA1					27,99							27,99
Montagne	PA1	1C_foin	Herbe_PA1							3,71	2,23	1,67			
Montagne	PA1	1C_ens	Herbe_PA1						3,71	3,71	2,23	1,67			
Montagne	PA1	1C_ens	Ensilage_PA1				19,25								19,25
Montagne	PA1	2C_ens	Ensilage_PA1				19,25								19,25
Montagne	PA1	2C_ens	regain_PA1						6,31						6,31
Montagne	PA1	2C_ens	herbe_PA1								2,23	1,67			
Montagne	PA2	paturage	Herbe_PA2				12,17	23,24	18,25	7,33	7,33	4,75	3,56		76,62
Montagne	PA2	1C_foin	Foin_PA2					39,42							39,42
Montagne	PA2	1C_foin	Herbe_PA2							7,33	4,75	3,56			
Montagne	PA2	1C_ens	Ensilage_PA2				27,60								27,60
Montagne	PA2	1C_ens	Herbe_PA2						7,33	7,33	4,75	3,56			
Montagne	PA2	2C_ens	Ensilage_PA2				27,60								27,60
Montagne	PA2	2C_ens	regain_PA2						12,46						12,46
Montagne	PA2	2C_ens	herbe_PA2								4,75	3,56			
Montagne	PA3	paturage	Herbe_PA3				16,81	24,43	19,18	9,81	9,81	5,15	3,86		89,06
Montagne	PA3	1C_foin	Foin_PA3					46,44							46,44
Montagne	PA3	1C_foin	Herbe_PA3							9,81	5,15	3,86			
Montagne	PA3	1C_ens	Ensilage_PA3				34,30								34,30
Montagne	PA3	1C_ens	Herbe_PA3						9,81	9,81	5,15	3,86			
Montagne	PA3	2C_ens	Ensilage_PA3				34,30								34,30
Montagne	PA3	2C_ens	regain_PA3						16,68						16,68
Montagne	PA3	2C_ens	herbe_PA3								5,15	3,86			
Montagne	PA4	paturage	Herbe_PA4				9,94	27,82	21,84	11,13	11,13	3,19	2,40		87,46
Montagne	PA4	1C_foin	Foin_PA4					33,87							33,87
Montagne	PA4	1C_foin	Herbe_PA4							11,13	3,19	2,40			
Montagne	PA4	1C_ens	Ensilage_PA4				26,96								26,96
Montagne	PA4	1C_ens	Herbe_PA4						11,13	11,13	3,19	2,40			
Montagne	PA4	2C_ens	Ensilage_PA4				26,96								26,96
Montagne	PA4	2C_ens	regain_PA4						18,93						18,93
Montagne	PA4	2C_ens	herbe_PA4								3,19	2,40			
Montagne	PA5	paturage	Herbe_PA5				9,94	20,54	16,13	11,13	11,13	3,19	2,40		74,47
Montagne	PA5	1C_foin	Foin_PA5					33,87							33,87
Montagne	PA5	1C_foin	Herbe_PA5							11,13	3,19	2,40			
Montagne	PA5	1C_ens	Ensilage_PA5				23,33								23,33
Montagne	PA5	1C_ens	Herbe_PA5						11,13	11,13	3,19	2,40			
Montagne	PA5	2C_ens	Ensilage_PA5				23,33								23,33
Montagne	PA5	2C_ens	regain_PA5						18,93						18,93
Montagne	PA5	2C_ens	herbe_PA5								3,19	2,40			

**Tableau 9.** Quantité de fourrage pour les 5 prairies d'altitude (PA1 à PA5) pour l'itinéraire technique ITK1 « pâturage en toutes saisons de la production d'herbe », mois par mois, avec valeurs moyennes et écart type.

Production / mois	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Total
PA1 Fourrage (kg MS / ha)	816	1,706	1,340	371	371	223	167	4,827
PA2 Fourrage (kg MS / ha)	1,217	2,324	1,825	733	733	475	356	7,306
PA3 Fourrage (kg MS / ha)	1,681	2,443	1,918	981	981	515	386	8,520
PA4 Fourrage (kg MS / ha)	994	2,782	2,184	1,113	1,113	319	240	8,506
PA5 Fourrage (kg MS / ha)	994	2,054	1,613	1,113	1,113	319	240	7,208
Moyenne de PA1 à PA5	1,140 ± 247	2,262 ± 305	1,776 ± 240	862 ± 248	862 ± 248	370 ± 100	278 ± 75	7,273 ± 1005

## 2.2 Intégration des contraintes géographiques

A l'aide de la programmation mathématique sous la plateforme de modélisation GAMS, on intègre les contraintes géographiques à savoir la prise en compte de pentes et des distances entre parcelles et siège d'exploitation. Le modèle Orfee n'intégrant pas de fonction de spatialisation on raisonne en termes de quantité pour matérialiser les contraintes liées aux pentes et aux distances des parcelles au siège de l'exploitation.

- ***La quantification de la biomasse issue des surfaces mécanisables et non mécanisables permet de prendre en compte les pentes sur les parcelles :***  
Les contraintes spécifient que la surface minimale pâturée pour chaque type de prairie doit être supérieure ou égale à la surface totale non mécanisable.
- ***La quantification la biomasse issue des surfaces accessibles aux vaches laitières permet de prendre en compte l'éloignement des parcelles au siège de l'exploitation :*** Les contraintes spécifient que les quantités d'herbe pâturée par les vaches laitières doivent être inférieures ou égale à la quantité d'herbe pâturable sur les surfaces accessibles aux vaches laitières en lactation.

### 2.2.1 Paramètres utilisés pour la prise en compte des pentes et distances

On considère les surfaces à pentes accentuées comme les surfaces à valoriser uniquement par pâturage. Les proportions de ces surfaces à fortes pentes sont déterminées pour chaque type de prairies. Toutefois les estives sont considérées comme les surfaces à fortes pentes donc uniquement valorisées par pâturage. Pour décider de la possibilité de fauche ou non, on impose au modèle de faire absolument pâturer les surfaces non mécanisables.

On définit ainsi dans le modèle les surfaces non fauchables par **min\_pat\_PA\***, on a :

```
min_pat_PA1 "surface minimum pâturable sur PA1"  
min_pat_PA2 "surface minimum pâturable sur PA2"  
min_pat_PA3 "surface minimum pâturable sur PA3"  
min_pat_PA4 "surface minimum pâturable sur PA4"  
min_pat_PA5 "surface minimum pâturable sur PA5"
```

On définit les surfaces maximales pâturable par les vaches laitières par **max\_pat\_VL\_PA\*** et on a :

max_pat_VL_PA1	"surface maximale de PA1 pâturable par les vaches laitière"
max_pat_VL_PA2	"surface maximale de PA2 pâturable par les vaches laitière"
max_pat_VL_PA3	"surface maximale de PA3 pâturable par les vaches laitière"
max_pat_VL_PA4	"surface maximale de PA4 pâturable par les vaches laitière"
max_pat_VL_PA5	"surface maximale de PA5 pâturable par les vaches laitière"

### **2.2.2 Intégration des contraintes de pentes déterminant la possibilité de fauche ou de pâturage des prairies**

Les surfaces sont affectées d'un pourcentage qui détermine leur part non mécanisable

`min_pat_PA1 = sum(castype_sim,car_castype('PA1',castype_sim))*a`

`min_pat_PA2 = sum(castype_sim,car_castype('PA2',castype_sim))*w`

`min_pat_PA3 = sum(castype_sim,car_castype('PA3',castype_sim))*x`

`min_pat_PA4 = sum(castype_sim,car_castype('PA4',castype_sim))*y`

`min_pat_PA5 = sum(castype_sim,car_castype('PA5',castype_sim))*z`

On a  $w\%$  de PA2 qui est non mécanisable, cette surface sera donc absolument valorisée par pâturage de même que  $x\%$  de PA3,  $y\%$  de PA4 et  $z\%$  PA5. PA1 étant considérée comme estive, 100% de PA1 sont non mécanisables ( $a= 100\%$ ).

Les contraintes spécifient que la surface minimale pâturée pour chaque type de prairie doit être supérieure ou égale à la surface totale non mécanisable. Pour les prairies de type PA2, la contrainte de pente est représentée dans le modèle comme suite :

`E_HA_MIN_paturage_PA2(t)..`

`sum (rot,V_HA_CULTURE('PA2',rot,'paturage',t)) =g= min_pat_PA2;`

### 2.2.3 Intégration des contraintes pour matérialiser les surfaces accessibles aux vaches laitières en lactation

**On définit la quantité d'herbe de PA\* pâturée par les vaches laitières en lactation par :**  $\text{sum}((\text{race\_z}, \text{a\_z}, \text{vel\_z})\$ (\text{bovLait}(\text{race\_z}) \text{ and } \text{prod\_Lait}(\text{race\_z}, \text{a\_z}, \text{vel\_z}, \text{p})), \text{V\_Q\_Alim}(\text{'herbe\_PA2'}, \text{race\_z}, \text{a\_z}, \text{vel\_z}, \text{t}, \text{p}))$

**On définit le rendement de prairie de type PA\* pâturée par :**  $\text{rdt\_patur}(\text{'PA*}, \text{rot}, \text{'paturage'}, \text{'herbe\_PA*}, \text{p}))$

**On définit la surface de PA\* valorisée par pâturage par :**  
( $\text{rot}, \text{V\_HA\_CULTURE}(\text{'PA'}, \text{rot}, \text{'paturage'}, \text{t})$ )

**On définit le pourcentage de surface de PA\* pâturée accessible aux vaches laitières en lactation par :**  $\text{max\_pat\_VL\_PA*}$  Ce dernier représente une part de la surface de PA\* valorisée par pâturage lors de la simulation.

Les contraintes spécifient que les quantités d'herbe pâturée par les vaches laitières en lactation doivent être inférieures ou égale aux quantités d'herbe pâturnable sur les surfaces accessibles aux vaches laitières en lactation. On élabore les mêmes contraintes pour les 4 autres types de prairie. Toutefois la prairie de type PA1 considéré comme estive n'est pas accessible aux vaches laitières en lactation d'où  $\text{max\_pat\_VL\_PA1}=0$  dans la contrainte relative aux prairies de types PA1. Dans le cas des prairies de type PA2, les contraintes de pentes sont représentées dans le modèle Orfee comme suit :

$\text{E\_Q\_Alim\_Patur\_Poss\_VL\_PA2}(\text{t}, \text{p})..$   
sum(( $\text{race\_z}, \text{a\_z}, \text{vel\_z})\$ (\text{bovLait}(\text{race\_z}) \text{ and } \text{prod\_Lait}(\text{race\_z}, \text{a\_z}, \text{vel\_z}, \text{p})), \text{V\_Q\_Alim}(\text{'herbe\_PA2'}, \text{race\_z}, \text{a\_z}, \text{vel\_z}, \text{t}, \text{p}))=l=$   
 $\text{max\_pat\_VL\_PA2}*\text{sum}$   
( $\text{rot}, \text{V\_HA\_CULTURE}(\text{'PA2'}, \text{rot}, \text{'paturage'}, \text{t}) * \text{rdt\_patur}(\text{'PA2'}, \text{rot}, \text{'paturage'}, \text{'herbe\_PA2'}, \text{p}))$ ;

### 3. Paramétrage du modèle Orfee

#### 3.1 Les cas-types

Nous utilisons les données de la base DIAPASON généralement sollicitée pour des études thématiques telles que l'autonomie alimentaire, les coûts de production, les bilans des minéraux (Charroin *et al.*, 2005). Deux cas-types double troupeaux bovin laitiers et allaitants sont sélectionnés dans cette base de données de référence Inosys-Réseaux d'élevage. Conçu à partir des résultats des exploitations suivies par les Réseaux d'Elevage, ce sont des modèles représentatifs d'exploitations viables localisées dans une région et construit à partir de données de fermes réelles à travers un vaste réseau de fermes commerciales et de connaissances spécialisées.

Ils décrivent le fonctionnement cohérent d'une exploitation en régime de croisière pour un système et un contexte donné (Charroin *et al.*, 2005). Les cas types utilisés sont précisément les cas type BL18 (Ferme\_1) et le cas type BL22 (Ferme\_2). Les exploitations correspondantes à ces cas-types sont situées dans les montagnes du Sud de l'Auvergne : dans le Cézalier (Monts Cantal) pour BL18 (Ferme\_1) et sur la Planète de St-Flour (Velay volcanique) pour BL22 (Ferme\_2). En plus de représenter des exploitations doubles troupeaux, ces deux cas-types représentent deux exploitations avec des différences prononcées selon le troupeau, la taille de l'exploitation et la configuration du parcellaire et sont représentatifs d'exploitations de montagne. La Ferme\_1 représente une exploitation de taille moyenne avec une proportion de bovin lait-viande (prim'Holstein et salers) équilibrée. Une partie des surfaces correspond à des estives. La ferme 2 est une exploitation de grande dimension avec système modernisé lait-viande (montbéliarde et aubrac). Son parcellaire est éclaté et comprend une petite partie de cultures (Voir cas types en annexes) (Tableau 10). Les caractéristiques de ces cas-types permettent de conforter la validation des adaptions du modèle mais aussi de généraliser nos résultats aux exploitations de la zone d'étude (Le Massif Central).

#### 3.2 Données

Le modèle utilise pour les simulations les données relatives à la main-d'œuvre (nombre d'UTH, nombre de titulaires et non titulaires), aux caractéristiques pédologiques (type de sol, fertilité du sol), aux surfaces des parcelles et au mode de gestion caractérisés par la répartition des périodes de vêlage, de traite, de pâturage

et la composition des rations alimentaires. On utilise des données zootechniques (effectifs, les différentes catégories de bovins, leurs espèces et races, les caractéristiques biologiques et de production) des données économiques (les aides, les Droits de Préemption Urbain, les indemnités compensatoires de handicap naturel, les primes par vache allaitante, les primes herbagères agro-environnementales, les charges de la main-d'œuvre, les prix des intrants...). On utilise également des données structurelles, à savoir le type de bâtiment et d'équipement, en précisant leurs capacités, caractéristiques et consommations d'énergie. A cela s'ajoute les rendements et valeurs alimentaires des prairies. Les prix des intrants et des produits agricoles sont déterminés à partir des indices de prix et les prix de l'INSEE de 2000 à 2015 l'année de référence étant l'année 2010.

**Tableau 10.** Caractéristiques des cas-types de BL18 (Ferme\_1) et BL22 (Ferme\_2).

Caractéristiques	Ferme_1 : Système lait-viande équilibré de taille moyenne avec estive	Ferme_2 : Système lait-viande modernisé de grande dimension avec parcellaire éclaté et des cultures
Races laitières	prim'Holstein	montbéliard
Races allaitantes	salers	aubrac
Chargement (UGB/ha SFP)	1,26	1,20
Nombre d'UGB lait	44	72
Nombre d'UGB viande	44	55
Nombre de vaches laitières	32	49
Nombre de vaches allaitantes	35	40
Litres de lait vendu par an (L/an)	180 000	300 000
Potentiel laitier (L/vache laitière/an)	5 860	6 433
UMO Totales	2,0	2,1
UMO exploitants	2,0	2,0
UMO salariée	0,0	0,1
Surface agricole utile (ha)	70	112
Estives (ha)	30	0
SFP (ha)	70	108
Surface en herbe (ha)	70	107
Surface de céréales (ha)	0	5
Surface de cultures fourragères (ha)	0	0

UGB : Unités de Gros Bétail

SFP : Surface Fourragère Principale

**Source :** *Référentiel cantal cas-types lait 2016 (conjoncture 2015) (Chambre d'Agriculture du Cantal, 2015)*

**Tableau 11.** Tableau récapitulatif des principaux paramètres de simulation.

Principaux paramètres de simulation	Ferme_1	Ferme_2
Nombre d'UGB total	88	127
Troupeau laitier : %UGB	50%	57%
Troupeau allaitant : %UGB	50%	43%
Nombre de vache laitières	33	49
Nombre de vaches allaitantes	35	40
SAU (ha)	70	112
SFP (ha)	70	107
Prairies temporaires (ha)	0	33
Prairies permanentes (ha)	70	0
Répartition en PA1 "estive" (ha)	30	0
Répartition en PA2 (ha)	5,5	20
Répartition en PA3 (ha)	15	25
Répartition en PA4 (ha)	12	15
Répartition en PA5 (ha)	8	14
Cultures (ha)	0	5
% max pâturable de prairie temporaire par les vaches laitières	0%	100%
% max pâturable PA1 (estive) par les vaches laitières	0%	0%
% max de PA2 pâturable par les vaches laitières	70%	65%
% max de PA3 pâturable par les vaches laitières	70%	65%
% max de PA4 pâturable par les vaches laitières	70%	65%
% max de PA5 pâturable par les vaches laitières	70%	65%
Quota laitier (L/ans)	180000	300000
UMO	2	2,1