

Tournesol : un modèle pour simuler les assolements en exploitation bovine laitière

F. GARCIA, P. FAVERDIN, L. DELABY, J.L. PEYRAUD

I.N.R.A. Unité Mixte de Recherche Production du Lait, 35590 Saint-Gilles

RESUME - Pour étudier l'effet des réglementations environnementales sur le fonctionnement des systèmes d'élevage, il est nécessaire d'envisager l'impact de ces réglementations sur les règles de décision de l'éleveur, et donc d'utiliser une approche à l'échelle de l'exploitation. L'allocation des cultures sur les parcelles est au cœur de la gestion des ressources alimentaires et des effluents d'élevage. Simuler les décisions d'assolements est donc indispensable pour représenter le fonctionnement d'une exploitation. Tournesol est un modèle qui permet de générer une succession d'assolements cohérents, permettant de produire les matières premières nécessaires à l'élevage des troupeaux (fourrages, concentrés et paille). Les assolements sont construits en fonction de la stratégie de l'éleveur, des règles agronomiques et d'utilisation des parcelles ainsi que des contraintes réglementaires. Tournesol est couplé à une procédure d'optimisation qui sélectionne chaque année l'assolement caractérisé par le meilleur équilibre entre les contraintes et les potentialités du système au travers d'une fonction objectif. Nous avons évalué la capacité de Tournesol à simuler des assolements reproduisant i) l'utilisation globale des parcelles et ii) les enchaînements de culture réalisés sur une exploitation à partir des données de la ferme du centre de formation de Quintenic (CA22) entre 1996 et 2005. Les résultats ont montré une bonne adéquation entre simulations et observations pour l'occurrence des cultures sur chaque parcelle et pour l'occurrence des différentes successions culturales à l'échelle de l'exploitation. Tournesol permet de générer de façon réaliste l'allocation spatio-temporelle des cultures sur les parcelles. De nombreuses utilisations seront possibles depuis la proposition d'assolements à l'échelle de l'exploitation jusqu'à la détermination des impacts paysagers en considérant l'ensemble des exploitations présentes sur un territoire.

Tournesol: a model to simulate cropping plans in dairy production systems

F. GARCIA, P. FAVERDIN, L. DELABY, J.L. PEYRAUD

I.N.R.A. Unité Mixte de Recherche Production du Lait, 35590 Saint-Gilles

SUMMARY - In order to investigate how environmental rules affect dairy systems it is necessary to understand how the rules alter a farmer's decisions, and consequently to use a framework at the farm level. Since the cropping plan is a key of feedstuff production and waste management, building a model to simulate cropping plans is a first step in modelling the dairy farm. Tournesol generates multi annual cropping plans that allow harvesting of the raw materials for the animals feeding and bedding (forages, concentrates and straw). Cropping plans are built according to the farmer's strategy, the agronomic rules, the plot utilisation rules and the constraints of policies. Tournesol uses an optimisation program that selects each year the cropping plan of best objective function. We estimated the ability of Tournesol to simulate the plot utilisation and the crop sequences of the cropping plans observed on a farm using data from the school farm of Quintenic (22) between 1996 and 2005. The results showed consistency between observations and simulations for crop occurrences on each plot and crop sequences at the farm level. Tournesol generates coherent spatio-temporal allocation of crops on plots. Further utilisation may include cropping plan advice and identification of the impact on landscape considering the farms installed on the same territory.

INTRODUCTION

La gestion d'exploitation laitière est soumise au respect de contraintes structurelles, économiques, zootechniques, agronomiques et réglementaires. Dans ce contexte, quantifier l'effet de ces contraintes sur le devenir des systèmes d'élevage et leurs possibilités d'adaptation nécessite une approche à l'échelle de l'exploitation. Les parcelles, avec les cultures qui leur sont associées, produisent à la fois les stocks d'aliments, des cultures de rente et reçoivent les effluents. L'assolement est donc au cœur de la gestion des ressources alimentaires et des effluents d'élevage dans le fonctionnement de l'exploitation. Il constitue un levier d'action du système et est un révélateur des stratégies d'élevage.

Nous avons développé un modèle nommé Tournesol afin de générer des assolements pluriannuels en tenant compte de la stratégie globale et des règles de décision de l'éleveur. Ce texte décrit la conception du modèle Tournesol, son couplage avec un algorithme évolutionnaire et une illustration de son utilisation.

1. DESCRIPTION DU MODELE TOURNESOL

Tournesol évalue sur un parcellaire considéré la capacité des assolements à produire les matières premières nécessaires à l'alimentation d'un troupeau et à la litière (paille). Cette

évaluation intègre la stratégie de l'éleveur (calendrier d'alimentation, autonomie alimentaire, cultures envisagées), l'accessibilité au pâturage et le potentiel agronomique des parcelles, les règles d'enchaînements des cultures et les réglementations (gel des terres).

Une fonction objectif combine ces critères pour estimer la capacité de l'assolement testé à couvrir les besoins en respectant au mieux les contraintes. La décision consiste à optimiser la répartition des cultures sur les parcelles. L'assolement optimisé pour une année modifie alors les paramètres utilisés pour simuler l'assolement de l'année suivante.

Comme suggéré par Maxime *et al.*, (1995) et Papy (2001), nous avons décrit la construction d'un assolement comme un processus incluant des règles de décision spatio-temporelles. Les règles temporelles concernent les successions culturales sur chaque parcelle et les règles spatiales concernent le potentiel spécifique de chaque parcelle et leur accessibilité aux vaches et aux génisses pour le pâturage.

Le tableau 1 regroupe les paramètres d'entrée du modèle.

1.1. ESTIMATION DES BESOINS ANNUELS EN MATIERES PREMIERES

Tournesol calcule les besoins en herbe pâturée, fourrages conservés, céréales... du troupeau par jour et multiplie ces quantités par le nombre de jours pendant lesquels s'applique la ration. Il gère un type moyen de ration par mois et utilise

le système INRA des Unités d'Encombrement pour estimer les quantités ingérées en prenant une valeur moyenne d'encombrement de 0,4 pour les aliments concentrés. Une capacité d'ingestion (CI) différente pour les vaches laitières ((1) Dulphy *et al.* 1989) et pour les génisses ((2) Favardin, non publié) est utilisée dans ce calcul.

$$CIVL = (22 - 8,25^{(-0,02 \times PL)} + (PV - 600) \times 0,01) / UE \quad (1)$$

$$CIG = (0,04 + 0,096 \times AV + 0,0075 \times PV) / UE \quad (2)$$

où *CIVL* et *CIG* sont respectivement les capacités d'ingestion des vaches laitières et des génisses, *PV* le poids vif, *PL* la production laitière journalière par vache, *AV* l'âge au premier vêlage entre 24 et 36 mois et *UE* est la valeur d'encombrement de la ration. Les besoins de fourrages à produire intègrent un taux de perte variable selon le type de fourrage (de 15 % pour l'herbe pâturée à 30 % pour l'ensilage d'herbe).

Les besoins en paille pour la litière sont calculés en utilisant une quantité de paille nécessaire par vache ou génisse et par jour multipliée par le nombre d'animaux et le nombre de jours passés en bâtiment.

Tournesol calcule un "besoin annuel" en jachère pour chaque assolement, exprimé en surface et qui correspond à un pourcentage paramétrable de la surface en céréales et oléoprotéagineux.

1.2. ESTIMATION DES RENDEMENTS POTENTIELS

Tournesol calcule une production basale par parcelle (équation 3) en fonction du rendement moyen régional *RendMoy_i* de la culture et de la capacité de chaque parcelle *RendSpec_{ij}* à exprimer ce rendement. Pour chaque culture, exceptée la prairie, *PP_j* impose une production basale nulle en cas de parcelle en prairie permanente.

$$ProdBasale_{ij} = RendMoy_i \times RendSpec_{ij} \times Surface_j \times PP_j \quad (3)$$

Cette production est modulée chaque année par des règles de décision concernant les précédents culturaux. Tournesol tient compte de la fréquence d'occurrence de chaque culture sur chaque parcelle, une fréquence trop élevée pouvant réduire les rendements. Il tient aussi compte de l'effet des précédents culturaux, qui peut être positif ou négatif. *PrecCoeff_{i'k-1,ik}* a été défini à dire d'expert et exprime l'effet négatif ou positif de chaque précédent culturel *i'* sur le rendement de la culture *i*. *Prec_{ijk}* est le nombre d'affectations successives de la culture *i* sur la parcelle *j* au cours des trois dernières années de simulation. Quand la fréquence d'occurrence *Freq_{ijk}* d'une culture sur une parcelle devient supérieure à la fréquence maximale d'occurrence de la culture *FreqMax_i* déterminée à dire d'expert, alors la production *Production_{ijk}* diminue de la façon suivante :

$$Production_{ijk} = ProdBasale_{ij} \times PrecCoeff_{i'k-1,ik}^{(Prec_{ijk})} \times EffetFreq$$

$$EffetFreq = 1 \text{ si } Freq_{ijk} \leq FreqMax_i$$

$$EffetFreq = FreqMax_i / Freq_{ijk} \text{ si } Freq_{ijk} > FreqMax_i \quad (4)$$

1.3. CALCUL DE LA PRODUCTION DE MATIERES PREMIERES PERMISE PAR UN ASSOLEMENT

Chaque assolement est défini par l'ensemble des variables *Affectation_{jk}* qui représentent la culture affectée à chaque parcelle *j* pendant l'année *k*. *Affectation_{jk}* prend des valeurs de 1 à *n* (nombre de cultures).

Pour un assolement déterminé, Tournesol calcule la production totale de chaque matière première en sommant les productions réalisées sur chaque parcelle.

La production d'herbe pâturée pour les vaches laitières et pour les génisses est modulée sur chaque parcelle par

VLAcc_j ou *HAcc_j* qui expriment l'accessibilité des parcelles au pâturage. Pour obtenir la production de paille, la production en grain est convertie par *CoefPaille_i* qui est défini à dire d'expert. Dans le cas de la jachère, le rendement moyen est fixé à 1 ce qui permet de calculer non pas une production mais une surface allouée à la jachère.

1.4. EVALUATION D'UN ASSOLEMENT

Chaque matière première est caractérisée par une valeur positive *SurV_t* qui représente la valeur d'usage d'un surplus de 1 tonne (T) de matière sèche (MS). La valeur négative *DefV_t* correspond à la valeur d'usage d'un déficit d'1 T de MS. Ces valeurs sont définies sur la base d'une valeur économique de marge brute à la vente ou de prix d'achat de la matière première mais également en fonction de la stratégie de l'éleveur. En particulier le souhait d'autonomie fourragère généralement observé en élevage bovin peut conduire à allouer une très forte valeur de déficit à l'herbe et à l'ensilage de maïs. Il en est de même pour la jachère car la réglementation est considérée comme une contrainte stricte. Généralement, un surplus d'herbe pâturée ou de jachère n'a pas de valeur d'usage car ces deux matières premières n'ont pas de valeur économique systématique.

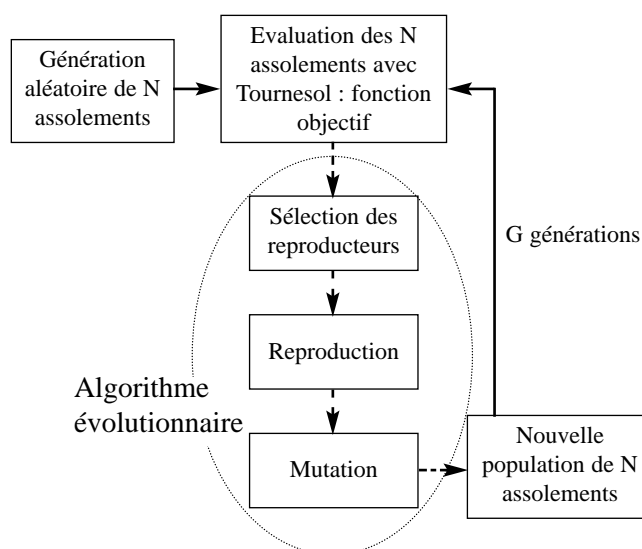
Tournesol calcule la valeur d'une fonction objectif pour évaluer la capacité de l'assolement à couvrir les besoins de l'exploitation et à générer un revenu par la vente des surplus. Les surplus et les déficits associés à chaque matière première *t* sont multipliés par les valeurs qui leur sont associées pour calculer la fonction objectif :

$$FonctionObj_k = \sum_{t=1}^q (Surplus_{tk} \times SurV_t + Deficit_{tk} \times DefV_t) \quad (6)$$

où *q* est le nombre de matières premières produites sur l'exploitation. Ainsi, maximiser la fonction objectif permet de maximiser les surplus et de minimiser les déficits ayant de fortes valeurs d'usage, sélectionnant ainsi l'assolement satisfaisant le mieux à la stratégie de l'éleveur.

1.5. COUPLAGE DE TOURNESOL AVEC UN ALGORITHME EVOLUTIONNAIRE

Figure 1 : fonctionnement d'un algorithme évolutionnaire



Tournesol fonctionne avec une procédure d'optimisation qui doit être capable d'optimiser un grand nombre de paramètres (égal au nombre de parcelles). La fonction objectif est non linéaire et est caractérisée par des contraintes sur des variables dépendantes entières (*Affectation_{jk}*).

Les procédures d'optimisation classiques ont des difficultés à trouver la solution optimale pour ces situations (Ragsdale, 2003). Nous avons choisi l'algorithme évolutionnaire qui est une méthode non déterministe et non orientée capable de trouver une bonne solution pour les problèmes complexes. Un algorithme évolutionnaire transpose les processus de l'évolution *i.e.* la sélection naturelle, la reproduction sexuelle et la mutation (figure 1) pour rechercher la solution optimale. L'algorithme génère aléatoirement une population initiale d'assolements. Il évalue chaque assolement sur la valeur de sa fonction objectif. Les assolements qui satisfont toutes les contraintes et qui montrent les meilleures valeurs de fonction objectif sont sélectionnés pour transmettre leurs caractéristiques à la génération suivante d'assolements. Des mutations peuvent être ajoutées pendant le processus pour augmenter la variabilité de la prochaine population d'assolements. Ainsi, après plusieurs générations, la population converge autour de la solution optimale. Tournesol est implémenté en Visual Basic pour Excel et nous avons utilisé l'algorithme Premium Solver for Education 5.0.

2. APPLICATION DE TOURNESOL AU CAS DE LA FERME ECOLE DE QUINTENIC (CA22)

La ferme école de Quintenic assure production laitière et de taurillons sur une surface cultivable de 70 ha. Le quota laitier de l'exploitation est de 240 000 l et la production laitière moyenne par vache est de 7000 kg par lactation. Le troupeau se compose en moyenne de 36 vaches laitières, de 36 génisses et de 54 taurillons.

L'exploitation comprend 34 parcelles. 26 ha sont accessibles pour le pâturage des VL et 35 ha sont accessibles aux génisses. Les prairies permanentes représentent 3,5 ha, et 5 natures de cultures sont implantées à la ferme de Quintenic : prairie, maïs, blé, triticale et colza.

2.1. PARAMETRAGE DE TOURNESOL

Les rendements moyens, besoins annuels et le parcellaire ont été spécifiés au cours d'une enquête auprès du responsable des cultures. Le tableau 2 résume les paramètres qui caractérisent les cultures réalisées sur la ferme de Quintenic.

Tableau 2 : paramètres des cultures à Quintenic

Culture _i	RendMoy _i (tMS/ha)	FreqMax _i	CoefPaille _i
Prairie	10,0	1,00	-
Maïs	12,5	0,66	-
Blé	8,0	0,50	1,2
Triticale	7,0	0,50	0,9
Colza	3,5	0,25	-

Nous avons précisé les proportions de rendements moyens réalisés sur chaque parcelle grâce à des observations réalisées entre 1993 et 2005. La stratégie de l'éleveur en termes de rotations de cultures a été traduite dans une matrice de transition (tableau 3).

Nous avons alloué une très forte valeur de déficit pour l'herbe et l'ensilage de maïs pour assurer l'autonomie fourragère. Les besoins annuels de chaque matière première étaient connus.

Tableau 3 : coefficients $PrecCoeff_{i|k-1,ik}$ de modification du rendement en fonction des précédents culturaux

Culture en année k	Culture en année k-1					
	Prairie	Maïs	Blé	Triticale	Colza	Jachère
Prairie	1	1	0,3	0	0	1
Maïs	1,07	1	1	1	0,9	1
Blé	0	1	0	0	0,3	0
Triticale	0	1	0,9	0	1	0
Colza	0	0	1	0	0	0
Jachère	1	1	0	0	0	1

2.2. SIMULATIONS ET ANALYSES STATISTIQUES

Les assolements ont été simulés de 1996 à 2005. L'assolement observé en 1995 à Quintenic a servi d'assolement de départ pour initialiser la simulation. Les assolements de 1993 et 1994 ont été utilisés pour initialiser les variables $Prec_{ijk}$ et $Freq_{ijk}$.

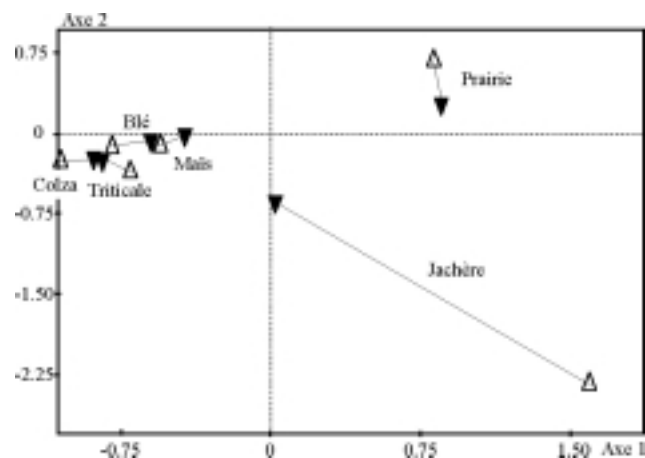
Nous avons comparé pour les assolements observés et simulés 1- les occurrences cumulées pendant 10 ans de chaque culture sur chaque parcelle et 2- les occurrences cumulées de chaque succession culturale biannuelle pour l'ensemble des parcelles. Nous avons réalisé des analyses factorielles des correspondances simples sur ces deux variables avec le logiciel SPAD.

3. RESULTATS

Les simulations réalisées ont montré une bonne stabilité de la production de chaque culture. En particulier, la production totale de maïs a varié de 325 à 347 T de MS par an. De la même façon, la production totale d'herbe est restée très stable entre 165 et 180 T de MS par an.

3.1. UTILISATION GLOBALE DES PARCELLES

Figure 2 : projection des occurrences de cultures observées (Δ) et simulées (\blacktriangledown) pendant 10 ans.

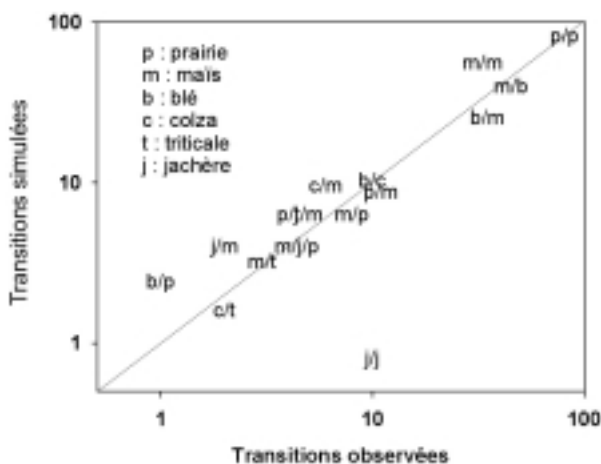


L'analyse des correspondances simples réalisée sur les occurrences de cultures sur chaque parcelle pendant 10 ans a conduit à 3 axes significatifs expliquant 46,7 %, 36,2 % et 11,5 % de la variabilité observée. La figure 2 représente la projection des scores des occurrences observées et simulées de chaque culture le long des deux premiers axes. Les projections montrent une bonne concordance observé/simulé, à l'exception de la jachère.

3.2. SIMULATION DES SUCCESSIONS CULTURALES

La figure 3 montre une bonne adéquation des séquences observées et simulées. Les séquences majoritaires à savoir prairie/prairie, maïs/maïs, maïs/blé et blé/maïs sont globalement bien simulées, même si le modèle accepte un peu plus les successions maïs/maïs que le responsable de la ferme. Les séquences plus rares sont également bien simulées sauf les successions jachère/jachère qui sont sous-représentées dans les simulations.

Figure 3 : transitions de cultures simulées et observées pendant 10 ans à Quintenic. m/b correspond par exemple à une succession maïs/blé



4. DISCUSSION

Le modèle Tournesol a été développé pour simuler des assolements cohérents dans les systèmes de production bovine laitière. Nous avons focalisé notre attention sur la capacité de Tournesol à simuler les composantes spatiales et temporelles des assolements, c'est-à-dire les occurrences globales de chaque culture sur chaque parcelle et les successions culturales biennuelles réalisées sur l'exploitation.

Les assolements simulés pour l'exploitation de Quintenic sont cohérents avec les entrées du modèle qui traduisent la stratégie de l'éleveur (besoins annuels, règles de rotation des cultures, règles d'utilisation des parcelles). Ainsi les assolements simulés permettent chaque année de couvrir les besoins définis sur l'exploitation. De la même façon, les assolements simulés reproduisent bien l'utilisation globale des parcelles pour les cultures, à l'exception de la jachère pour laquelle nous n'avons pas défini de parcelles spécialement dédiées au gel des terres contrairement à ce qui a été majoritairement réalisé.

Nos résultats montrent également que la transposition des règles de successions culturales permet aussi de simuler correctement les séquences de cultures.

L'originalité de Tournesol réside dans les deux points suivants

- Tournesol gère des parcelles et prend en compte les précédents culturaux. Il intègre donc les contraintes d'accessibilité pour le pâturage ainsi que l'historique des parcelles. La plupart des modèles d'optimisation des assolements calculent une surface optimale à allouer à chaque culture, sans considération de la parcelle ni de son historique (Itoh *et al.*, 2003 ; Ortega *et al.*, 2004).

- Tournesol formalise les relations entre système de production animal et système de cultures pour générer les assolements.

Une des améliorations envisagées pour Tournesol est de caractériser chaque association culture-parcelle par une surface et un potentiel d'épandage d'effluents afin de définir des capacités annuelles d'épandage de lisier et de fumier. Cela permettrait de tenir compte de la gestion des effluents et des contraintes qui s'y appliquent dans la simulation des assolements pluriannuels. Il est à terme envisageable de coupler Tournesol avec des modèles agronomiques à l'échelle parcellaire pour évaluer le devenir des éléments à risque environnemental en fonction de la stratégie de l'éleveur.

CONCLUSION

La formalisation de la stratégie de l'éleveur par les besoins annuels, les règles agronomiques de rotation et les règles d'utilisation des parcelles permet de simuler les assolements des systèmes de production bovine laitière. La cohérence des assolements simulés avec les assolements observés met en évidence le lien fort qui existe entre production laitière, nutrition animale, gestion du troupeau et assolements. Tournesol est basé sur une approche originale qui permet de simuler l'allocation spatio-temporelle des cultures sur les parcelles. Les utilisations futures de Tournesol pourront concerner le conseil en assolement, l'impact paysager des stratégies d'élevage et la gestion des effluents d'élevage.

Les auteurs remercient Jean-Marie Paillat et François Guerrin (CIRAD), Marie-Madeleine Cabaret et Daniel Haquin (CA22), Eric Masson et Philippe Du Cheyron (Arvalis), Christine Baratte (INRA), Robert Blondel (CRAB) et Raymond Reau (CETIOM).

Dulphy J-P., Faverdin P., Jarrige R., 1989. *Ruminant Nutrition, recommended allowances and feed tables*, INRA, Paris and J. Libbey Eurotext, 61-70.

Itoh T., Ishii H., Nansaki T., 2003. *Int. J. Prod. Economics.*, 81-82, 555-558.

Maxime F., Mollet J-M., Papy F., 1995. *Cahiers. Agric.* 4, 351-362.

Ortega J.F., Juan J.A., Tarjuelo J.M., Lopez E., 2004. *Irr. Sci.* 23, 61-75.

Papy F., 2001. *Modélisation des agro écosystèmes et aide à la décision*. INRA Editions, Versailles.

Ragsdale C.T., 2003. *In Spreadsheet modelling and decision analysis, South-Western publishing*, 399-408.

Tableau 1 : paramètres d'entrée utilisés par Tournesol

Variable	Description
PV	Poids vif moyen des vaches laitières (kg)
PL	Production laitière moyenne (l) par vache et par jour
AV	Age au premier vêlage entre 24 et 36 mois
RendMoy _i	Rendement régional moyen de la culture <i>i</i> (t MS/ha)
RendSpec _{ij}	Proportion de RendMoy _i réalisé sur la parcelle <i>j</i>
Surface _j	Surface cultivable de la parcelle <i>j</i>
PP _j	0 quand parcelle <i>j</i> en prairie permanente, et 1 sinon
FreqMax _i	Fréquence maximale d'occurrence de la culture <i>i</i>
Freq _{ijk}	Fréquence d'occurrence de la culture <i>i</i> sur la parcelle <i>j</i> en année <i>k</i>
PrecCoef _{i^{k-1},ik}	Coefficient de production de la culture <i>i</i> en année <i>k</i> lié au précédent cultural
Prec _{ijk}	Nombre d'années (≤3) successives d'occurrence de la culture <i>i</i> sur la parcelle <i>j</i> en année <i>k</i>
Affectation _{jk}	Affectation de la culture sur la parcelle <i>j</i> en année <i>k</i>
VLAcc _j	0 si la parcelle <i>j</i> est non accessible aux VL, 1 sinon
HAcc _j	0 si <i>j</i> est non accessible aux génisses, 1 sinon
CoefPaille _i	Ratio de production paille grain pour la culture <i>i</i>
SurV _t	Valeur d'un surplus d'1t MS de la matière première <i>t</i>
DefV _t	Valeur d'usage d'un déficit d'1t MS pour la matière première <i>t</i>