Mélodie, un simulateur d'une exploitation d'élevage pour étudier les relations entre conduites des systèmes et risques pour l'environnement.

P. Faverdin[1,2], X. Chardon[1,2,3], C. Rigolot[4,5,6], C. Baratte[1,2], C. Raison[3], B. Piquemal[1,2], R. Martin-Clouaire[7], J.-P. Rellier[7], A. Le Gall[3], J.-Y. Dourmad[4,5], P. Leterme[8,9], J.-M. Paillat[8,9], L. Delaby[1,2], F. Garcia[1,2], J.-L. Peyraud[1,2], J.-C. Poupa[10,11], T. Morvan[8,9] and S. Espagnol[6]

[1] INRA, UMR1080, Production du Lait, F-35590 St-Gilles, France

[2] Agrocampus Ouest, UMR1080 Production du Lait, F-35000 Rennes, France

[3] Institut de l'Elevage, Monvoisin, F-35650 Le Rheu, France

[4] INRA, UMR1079, Système d'élevage nutrition animale et humaine, F-35590, St-Gilles, France

[5] Agrocampus Ouest, UMR1079 Système d'élevage nutrition animale et humaine, F-35590, St-Gilles, France

[6] IFIP - Institut du porc, 35650 Le Rheu, France

[7] INRA, UR875 Biométrie et Intelligence Artificielle, 31326 Castanet-Tolosan, France

[8] INRA, UMR1069 Sol Agro et hydrosystème Spatialisation, F-35000 Rennes, France

[9] Agrocampus Ouest, UMR1069 Sol Agro et hydrosystème Spatialisation, F-35000 Rennes, France

[10] INRA, UMR1302 Sciences sociales, agriculture et alimentation, espace et environnement, F-35000, Rennes, France

[11] Agrocampus Ouest, UMR1302 Sciences sociales, agriculture et alimentation, espace et environnement, F-35000, Rennes, France

Correspondance : philippe.faverdin@rennes.inra.fr

Résumé

L'évaluation environnementale des systèmes de production est devenu un enjeu important afin de définir les pistes favorisant le développement de systèmes plus efficients et plus respectueux de l'environnement. C'est pour mieux évaluer ces systèmes et les adaptations que l'on peut y apporter que le modèle MELODIE a été développé. En proposant une architecture générique originale faisant interagir un modèle simulant le pilotage et un modèle simulant les processus biotechniques, MELODIE offre la possiblité de décrire le fonctionnement de systèmes d'élevage très différents. Il permet de comparer différents scénarios de conduite des élevages et de les évaluer à même structure d'exploitation et contexte pédo-climatique. Les nombreuses possibilités de sorties du modèle en font un outil particulièrement intéressant pour l'expérimentation virtuelle sur les systèmes d'élevage, complémentaire des approches par expérimentation systèmes ou suivis d'exploitations.

Mots clés : Systèmes d'élevage, modèle d'exploitation agricole, environnement, décision

Abstract: MELODIE, a simulator of animal farm to study relationships between management practices and environmental risks

The environmental assessment of farming systems has become an important issue to define the future of livestock with more efficient and environmentally friendly systems. To better evaluate these systems and their possible evolutions, the model MELODIE was developed. Based on a generic architecture coupling decision and biotechnical sub-models, MELODIE enables the simulation of very different livestock farming systems. It compares different scenarios of farm management and evaluates them

using the same farm structure and pedo-climatic context. The many possibilities of model outputs make it an interesting tool for virtual experimentation on farming systems, complementary to experimental design or farms survey.

Keywords: Livestock Farming systems, whole-farm model, environment, decision

Introduction

Les préoccupations environnementales sont devenues croissantes en élevage ces dernières années et le rapport de la FAO, Livestock Long Shadow (Steinfeld et al, 2006), a pointé du doigt un nombre important d'impacts potentiels de l'élevage sur l'environnement. La recherche a entrepris de nombreux travaux sur ce thème depuis des années pour mieux comprendre les processus impliqués et mieux évaluer les impacts. Les chercheurs abordent souvent la question de l'élevage sur l'environnement soit sous l'angle de l'animal, de ses effluents ou de la parcelle pour évaluer les émissions (disciplines zootechnique ou agronomique), soit à des échelles spatiales très larges (territoire, bassin versant, pays, terre) pour évaluer les impacts sur l'environnement. En réalité, nombre de décisions stratégiques ou tactiques susceptibles d'influencer l'environnement sont prises à l'échelle de l'exploitation.

Les solutions techniques proposées pour maîtriser les effluents à l'échelle de l'animal ou de la parcelle ne sont pas toujours pertinentes pour minimiser les différents impacts du système de production. Les différents éléments de la conduite du système d'exploitation sont souvent inter-dépendants et les effets bénéfiques d'une technique peuvent ainsi être neutralisés par la mise en place de pratiques compensatrices plus défavorables. La modélisation peut essayer de pallier ces inconvénients en étudiant de façon dynamique l'ensemble des éléments qui peuvent avoir un impact sur l'environnement. C'est ainsi qu'a été réalisé le projet Mélodie visant à élaborer un modèle innovant qui simule le fonctionnement d'une exploitation agricole à la fois sous l'angle des mécanismes biologiques ou biophysiques, mais aussi sous l'angle de la conduite de l'exploitation d'élevage.

1/ Evaluer l'impact environnemental du système de production dans son ensemble : une approche nécessaire mais complexe

La place de l'herbe et du maïs dans le système de production, le niveau de chargement en animaux au niveau de l'exploitation ou d'intensification au niveau de l'animal, la définition de mesures agri-environnementales efficaces en fonction du contexte pédoclimatique sont des questions aujourd'hui clairement posées, mais les outils pour analyser les intérêts relatifs à chaque stratégie restent limités. La plupart des indicateurs disponibles à l'échelle de l'exploitation ne sont pas accessibles à l'éleveur et ceux proposés à l'échelle du territoire lui paraissent peu adaptés. La question est donc aujourd'hui posée à la recherche de fournir de nouvelles pistes pour essayer d'éclairer ces questions d'une nouvelle manière.

Les systèmes de production jusqu'à présent étaient principalement étudiés soit par des suivis de réseaux, soit par des expérimentations à long terme « systèmes de production». Les approches par les réseaux sont riches à condition que l'information sur les systèmes soit suffisamment précise au niveau technique et que le nombre d'exploitations suivies soit suffisant. La base des réseaux d'élevage Diapason répond bien à ces critères, mais nécessite de nombreux ingénieurs pour assurer son suivi. Cependant, cette approche souffre toujours du fait que l'on compare les systèmes différents dans des structures souvent très différentes avec des potentialités très différentes. Il est donc souvent difficile des conclure sur les effets propres des systèmes de production d'autant plus que l'on observe une variabilité intra-système souvent plus forte que celle existant inter-systèmes sans que l'on sache bien expliquer ces variabilités. Les expérimentations à l'échelle du système de production sont extrêmement lourdes et n'offre pas de réponses rapidement aux questions posées. Par ailleurs, le nombre de

situations ainsi étudiées expérimentalement reste très limité et il est souvent difficile d'en définir les modalités sur des bases rigoureuses.

La modélisation et l'expérimentation informatique offrent de nouvelles possibilités pour comparer différents systèmes. Cette approche permet d'effectuer des comparaisons dans des conditions totalement similaires, d'observer un très grand nombre de variables de façon dynamique, d'accéder à des pas de temps longs pour étudier des effets cumulatifs et les capacités de résilience des systèmes en particulier face aux aléas climatiques. Les chercheurs de l'INRA en collaboration avec l'Institut de l'Elevage et l'Ifip-Institut du porc[1] ont donc créé un modèle environnemental dynamique pour simuler les flux qui présentent des risques pour l'environnement à l'échelle de l'exploitation agricole bovine et/ou porcine. Le modèle évalue ces flux en fonction du type d'élevage, du contexte pédoclimatique, et des stratégies de conduites (gestion des troupeaux, des effluents d'élevage, de l'assolement), et teste des systèmes qui combinent pratiques et stratégies innovantes. Ce modèle a été nommé MELODIE, pour Modélisation des Elevages en Langage Objet pour la Détermination des Impacts Environnementaux et a déjà été décrit antérieurement (Chardon et al, 2007 ; Chardon et al, 2010).

2/ Un modèle original couplant décisions et simulation des processus biotechniques à l'échelle de l'exploitation

MELODIE est basé sur l'ontologie des systèmes de production agricole proposé par Martin-Clouaire et Rellier (2003 & 2009). Dans cette ontologie, un système de production est composé de trois sous-systèmes : le système biotechnique (ou système contrôlé), le système de décision (ou le manager) et le système opérant. Le système opérant comprend les ressources utilisées pour réaliser les activités, comme le travail ou le matériel. Ces ressources ne sont pas prises en compte dans le fonctionnement de la version actuelle de MELODIE qui ne modélise pas pour l'instant le système opérant, mais les fonctionnalités sont cependant présentes pour le réaliser ultérieurement.

L'organisation générale du modèle est représentée à la Figure 1 qui illustre les interrelations entre le système de pilotage et le système biotechnique. Les nutriments pris en compte sont ceux dont les pertes sont associées à des risques pour l'environnement, carbone (C), azote (N), phosphore (P), potassium (K), cuivre (Cu) et zinc (Zn). Les flux d'eau sont également simulés. Pour prendre en compte la variabilité climatique, les simulations sont réalisées sur plusieurs décennies, nécessitant de modéliser les décisions de l'exploitant, au moins pour les décisions tactiques et opérationnelles. La prise en compte des pratiques de l'éleveur est un élément clé pour développer des systèmes de production plus respectueux pour l'environnement.

[1] Ces travaux ont été réalisés dans le cadre de l'Unité mixte de technologie Recherche et ingénierie en élevage laitier (UMT RIEL) associant l'INRA et l'Institut de l'Elevage

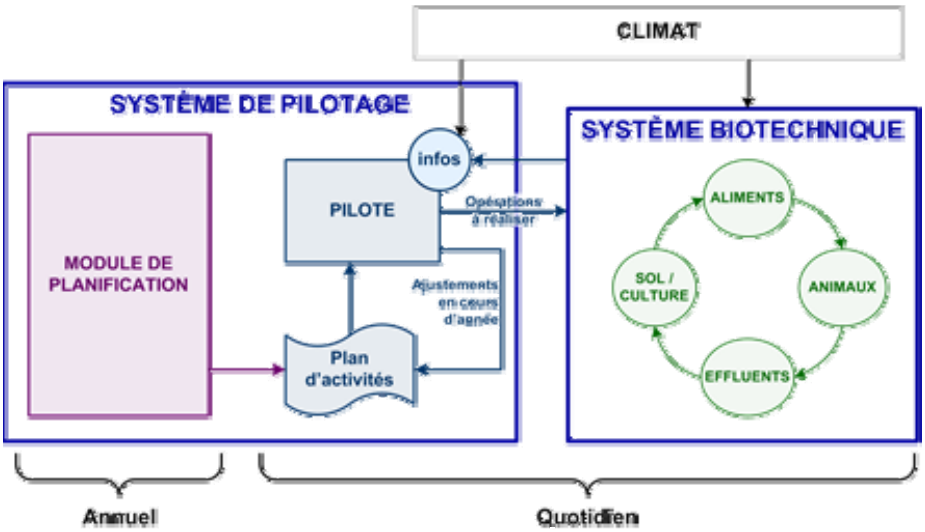

Figure 1 : Schéma de l'architecture générale du modèle MELODIE simulation l'interaction entre les processus de décisions et les processus biophysiques.

2.1 Le système biotechnique

Les principales sorties du modèle concernent à la fois les différents produits de l'exploitation (cultures, lait viande) et les émissions journalières vers l'environnement calculées pour chaque classe d'animaux pour chaque parcelle ou pour chaque type d'effluent. Ces différentes sorties peuvent être utilisées pour calculer des indicateurs d'impact environnemental comme ceux utilisés dans une analyse de cycle de vie (ACV).

Les flux de nutriments sont calculés chaque jour au sein du système biotechnique qui est connecté aux autres sous-modèles. Quatre principaux pools de circulation de ces nutriments sont pris en compte : les animaux, les effluents (en bâtiment, stockage et traitement), les sous-systèmes sols-cultures et enfin les stocks d'aliments. Les pertes vers l'air et vers l'eau sont simulées à la porte de l'exploitation de même que les flux de nutriments entre ces pools et au sein de ces pools. Ces flux de nutriments sont simulés avec différents degrés de précision : par exemple, les flux au sein du cycle de l'azote sont plus détaillés que ceux du Cu ou du Zn, pour lesquels seuls des bilans entre pools sont calculés. MELODIE utilise des modèles préexistants chaque fois que c'est possible. Pour chaque processus simulé, les modèles ou les équations disponibles ont été étudiés afin de retenir les plus appropriés. Lorsque aucun modèle avec les propriétés requises n'était disponible pour s'intégrer dans le modèle global, de nouveaux modèles ont été développés.

Dans le sous-modèle sol-culture, chaque parcelle est représentée individuellement. MELODIE utilise le modèle Stics (Brisson et al, 2003), un modèle générique simulant la croissance des plantes en même temps que les flux d'azote, de matière organique (y compris le carbone) et l'eau. Comme les flux de P, K Cu et Zn sont également concernés, des bilans de masse sont calculés à l'échelle de la parcelle en supposant une teneur moyenne de ces constituants dans les parties récoltées. Les teneurs des effluents des animaux apportés sur les parcelles sont calculées dans le sous-modèle « effluents ».

Les animaux ne sont pas simulés individuellement, mais sont regroupés en classes. Pour les vaches laitières et les génisses, le modèle GEDEMO (Coquil et al, 2005) simule en dynamique la démographie d'un troupeau en considérant les effectifs de 21 classes d'animaux homogènes en termes d'âge et/ou de stade physiologique. Pour les porcs, le modèle démographique repose sur des références pratiques et des connaissances d'experts tout en étant très lié avec le système de logement des animaux. Un

groupe peut être constitué soit de truies conduites ensemble, soit de porcs à l'engrais d'une même cohorte issus d'un groupe de truies. A la fois pour les porcs et les bovins, les flux de nutriments sont calculés pour chaque classe d'animaux, en multipliant la valeur de l'individu moyen par l'effectif de la classe. Pour les vaches laitières, les quantités ingérées sont calculées en utilisant les équations du système INRA (INRA 2007). Le modèle de Maxin (2006) décrit les bilans de nutriments (N, C, minéraux et eau) des vaches laitières et permet en particulier de calculer les teneurs en nutriments des fèces et des urines ainsi que la production de méthane en utilisant des données facilement disponibles. Pour les porcs, les équations utilisées pour la croissance, l'ingestion et l'excrétion des nutriments sont issues de la bibliographie.

Le stockage et le traitement de tous les effluents animaux sont gérés par un module commun qui calcule les évolutions des effluents et les pertes vers l'air, depuis l'excrétion par les animaux jusqu'à l'épandage au champ. Ce module a été développé spécifiquement pour MELODIE à partir d'un jeu d'équations empiriques existant et de facteurs d'émissions.

2.2 Le système décisionnel

Les décisions prises par les agriculteurs sont simulées par un système décisionnel qui interagit avec le système biotechnique pendant toute la simulation (Figure 1). Le rôle du système décisionnel consiste à déclencher en dynamique les opérations qui concernent les différentes entités du système biotechnique afin d'appliquer la stratégie de l'agriculteur. Les décisions sont prises à deux échelles de temps. Chaque année, un module de planification génère un plan prévisionnel des différentes activités à réaliser. L'ontologie des systèmes de production agricole fournit un cadre cohérent pour décrire explicitement ces plans ainsi que leur application flexible ainsi que leurs modifications, si nécessaire et si une stratégie alternative a été définie.

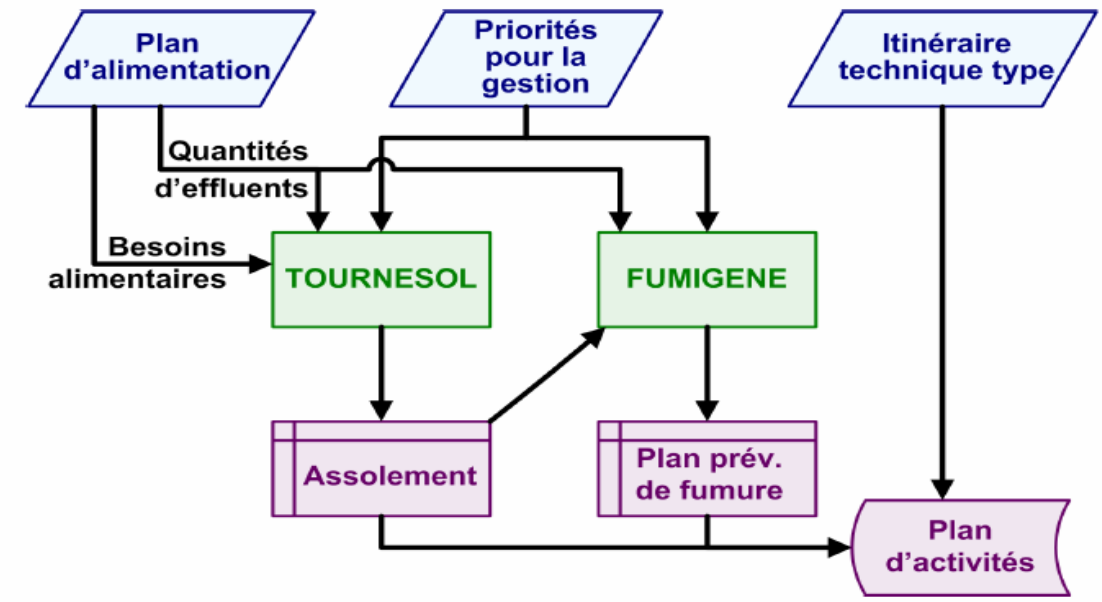

Figure 2 : Organisation du module de planification utilisé pour générer un plan d'activités pour les cultures et la gestion des effluents chaque année.

L'organisation générale du module de planification est représentée dans la Figure 2. Ce module permet de générer un assolement et un plan d'épandage pour l'année qui suit. Les cultures sont allouées aux différentes parcelles en fonction des objectifs et contraintes du système par le générateur d'assolement Tournesol (Garcia et al, 2005). Il considère les besoins en aliments et en paille associés à la stratégie

d'alimentation et au type de logement et applique les connaissances agronomiques (potentialités des parcelles et effet des rotations) pour générer les assolements qui satisfont les objectifs et les priorités définies par l'utilisateur du modèle. De façon similaire, le modèle Fumigene (Chardon et al, 2007) est utilisé pour générer les plans de fumure annuels en fonction des besoins propres à chaque système culture-parcelle et des priorités du manager. Les besoins en minéraux de chaque parcelle sont calculés en utilisant la méthode du bilan qui prend en compte le type de sol, l'historique de la parcelle (fertilisation et précédent de prairie ou de CIPAN lorsqu'il y en a), la culture à implanter et son rendement attendu. Les modules de planification Tournesol et Fumigene interagissent avec le système biotechnique en incorporant les informations sur les variations de stocks d'aliments, de paille et d'effluents. Par exemple, si pour une année donnée, la quantité d'herbe pâturée est élevée suite à des conditions favorables, les stocks d'ensilage de maïs seront encore importants en fin d'année. Les surfaces dédiées au maïs l'année suivante seront donc diminuées. De même, si la quantité d'effluents est plus forte que prévue, les quantités prévues pour l'épandage seront accrues. Les interactions entre les modules de planification et le système biotechnique sont un élément clé de MELODIE permettant des adaptations en fonction de la variabilité climatique interannuelle.

Le plan d'activités est constitué d'un ensemble d'activités organisées par différents opérateurs permettant d'indiquer comment le plan doit se dérouler (par exemple opérateurs de séquence ou d'itération). Les plans sont consultés chaque jour et appliqué en fonction du contexte. Les dates auxquelles les activités doivent avoir lieu ne figurent pas dans le plan qui contient seulement des fenêtres de temps et des opérateurs de prédicats d'ouverture (conditions liées à l'état du système biophysique) pour déterminer quand l'exécution est possible. Les opérations planifiées ne sont exécutées que lorsque les conditions sont réunies. Si nécessaire, la séquence des évènements du plan d'activités peut être modifiée. Dans MELODIE, ces opérateurs sont utilisés en particulier pour réaliser le plan d'alimentation des vaches et en particulier la gestion du pâturage. L'alimentation des vaches est adaptée à la disponibilité des ressources de la ferme qui sont très variables aussi bien au cours de l'année (dates de transition entre régimes, complémentation…) qu'entre années.

L'utilisateur du modèle doit définir un plan d'alimentation pour les animaux, c'est-à-dire les aliments à utiliser (nature et quantités s'ils ne sont pas offerts à volonté) au cours des différentes périodes de l'année pour les différents groupes d'animaux. L'utilisateur doit également fournir un plan d'activités contenant les activités de transition entre les rations et les activités de gestion du pâturage (changement de parcelles et ajustements de la ration en fonction de la disponibilité en herbe).

Au début de la simulation, les animaux sont en bâtiments pour l'hivernage. Au printemps, lorsque les quantités d'herbe disponibles par vache sur l'ensemble des parcelles sont supérieures à un seuil, le prédicat d'ouverture de mise à l'herbe devient valide, déclenchant le début de la saison de pâturage. Pendant cette période, une activité de déplacement des troupeaux d'une parcelle à une autre est itérée. A chaque changement de parcelle, l'état de la parcelle est examiné entraînant la prise de décisions. Lorsque trop peu d'herbe est disponible, des parcelles supplémentaires, initialement prévues pour la fauche, sont remises en pâture (si la biomasse d'herbe de ces parcelles n'est pas trop élevée) et des fourrages complémentaires peuvent être distribués. Inversement, si la quantité d'herbe disponible devient trop élevée, la distribution de fourrages complémentaires est arrêtée et des parcelles peuvent être récoltées. L'utilisateur ne fournit qu'une seule description générale de la conduite alimentaire qui est exécutée pendant les simulations à long terme en fonction du climat et des variations de la croissance d'herbe.

En résumé, MELODIE comprend des modèles des processus de décision des agriculteurs, ce qui assez rare pour des modèles à cette échelle. Le principal intérêt du système décisionnel réside dans son importante interaction avec le système biotechnique, à la fois dans la conduite opérationnelle des activités durant l'année mais aussi dans la planification annuelle de ces activités. Grâce à ces interactions à deux pas de temps très différents, la conduite du système est ajustée en permanence aux conditions climatiques et à l'état du système, ce qui est essentiel pour permettre des simulations

réalistes de systèmes d'élevage sur le long terme et pour étudier à la fois la variabilité de la conduite et la résilience des systèmes.

3 Les sorties multiples de MELODIE décrivent le fonctionnement et les émissions des exploitations d'élevage

Les sorties de MELODIE sont particulièrement nombreuses et diversifiées compte tenu du nombre de variables simulées dans ce modèle de l'exploitation. Elles sont stockées dans une base de données relationnelle afin de permettre un traitement facilité des millions d'informations générées par une simulation sur une série climatique d'une trentaine d'années. Si toutes les informations ne sont pas utiles pour interpréter les sorties environnementales, beaucoup sont encore nécessaires aujourd'hui pour vérifier la qualité de simulation du système modélisé.

La difficulté des systèmes simulés réside dans l'évaluation de la qualité de la simulation. Le modèle peut très bien réaliser une simulation tout à fait correcte sur le plan informatique et de la modélisation des processus, mais peu vraisemblable par rapport à la réalité. Il convient donc de valider, souvent à titre d'expert, que les simulations réalisées sont bien cohérentes et que les paramètres et le plan d'activités défini comme entrées à la simulation ne conduisent pas à des comportements non réalistes du système. Faute de disposer aujourd'hui d'une méthode systématique de validation des simulations réalisées, un certain nombre de sorties sont réalisées pour permettre à l'utilisateur de MELODIE de vérifier cette cohérence. Cette étape est indispensable lorsqu'un nouveau système est simulé. Les adaptations autour de ce système sont généralement moins sensibles. Des graphiques générés en sortie sur le pilotage réalisé par MELODIE pendant la simulation offrent des aides précieuses pour évaluer la simulation. Pour vérifier comment la stratégie du plan d'alimentation a été appliquée à la fois au niveau du calendrier de pâturage (Figure 3) et de la ration des vaches (Figure 4), des graphiques de la dynamique de la réalisation de ce plan sont particulièrement utiles.

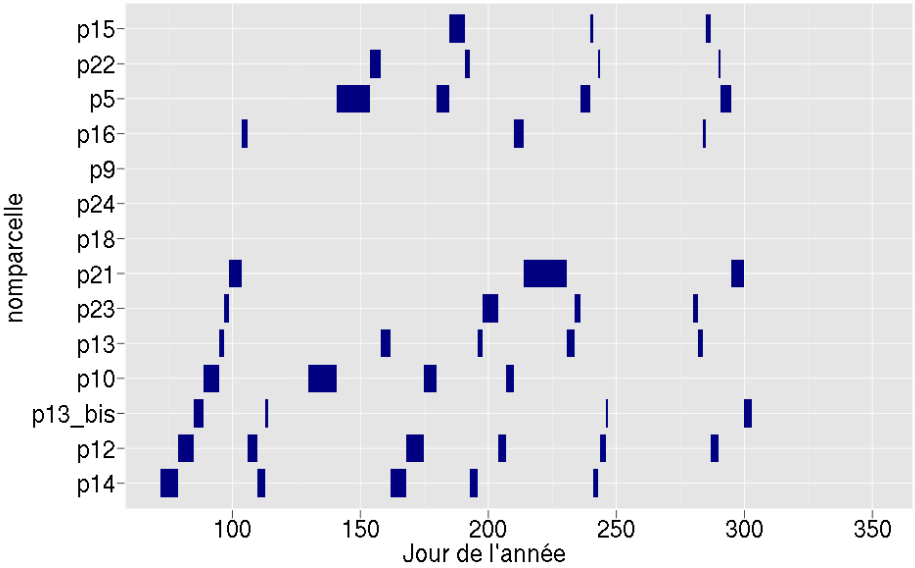

Figure 3 : Exemple de calendrier de pâturage simulé par MELODIE au cours d'une année avec rentrée des animaux faute de disponibilité d'herbe suffisante.

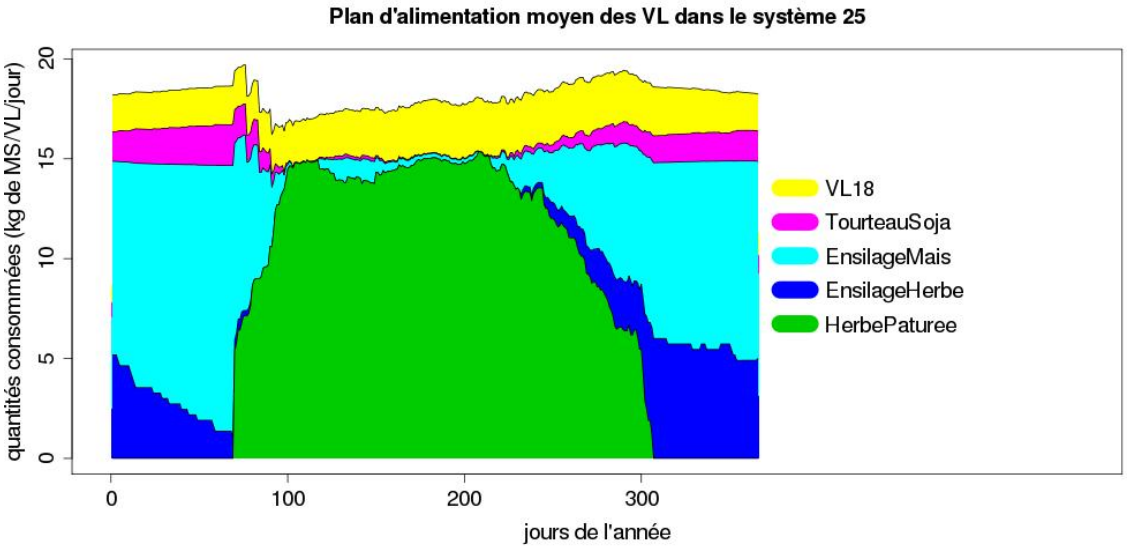

Figure 4 : Exemple de calendrier annuel d'alimentation du troupeau laitier simulé par MELODIE en fonction des règles d'un plan d'alimentation.

Bien entendu, les sorties les plus intéressantes concernent les aspects environnementaux. MELODIE offre la possibilité de suivre la dynamique de ces sorties à des pas de temps courts au sein d'une année, comme c'est le cas pour les émissions d'ammoniac et de méthane par les effluents d'un atelier porcs (Figure 5). Dans cet exemple, on peut voir clairement l'impact des stocks d'effluents et de la température sur les émissions. Cet exemple démontre que, malgré un atelier d'engraissement qui fonctionne en continu à même charge animale au cours d'une année, les émissions au cours de l'année ne sont pas constantes. Sans pouvoir encore valider la dynamique de ces émissions, on peut néanmoins penser que la prise en compte de la composition des effluents, des volumes stockés et de la température donne une prévision des émissions globales plus sensible aux pratiques que les coefficients d'émissions moyens généralement utilisés.

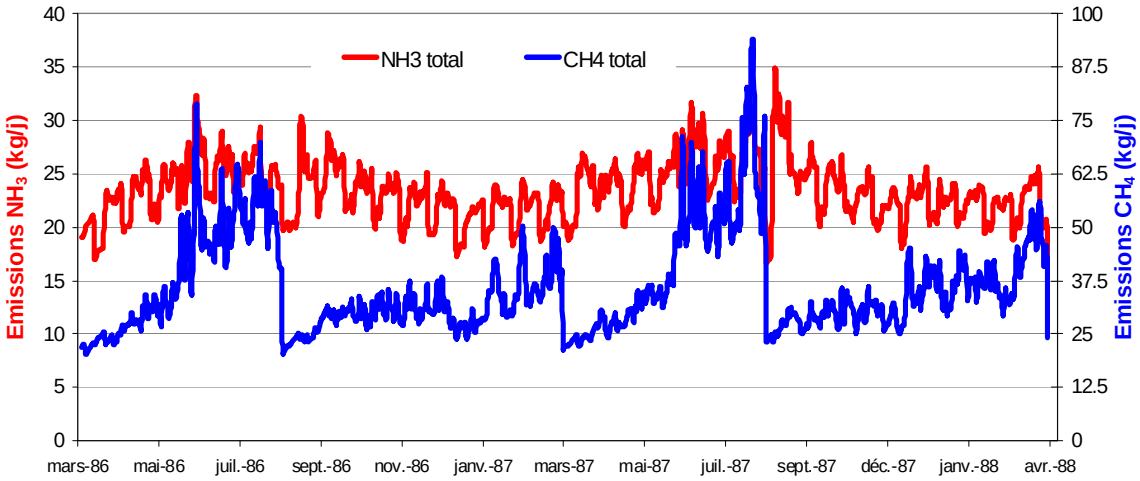

Figure 5 : Exemple de cinétique d'émissions d'ammoniac (kg/j) et de méthane (kg/j) par les effluents au sein d'un atelier de porcs à l'engrais au cours de l'année.

Mais, MELODIE permet également de réaliser une approche globale du système au pas de temps annuel. Il est alors possible de synthétiser tous les flux du système circulants durant une année.

L'exemple de la Figure 6 permet de montrer la quantification permise par MELODIE pour simuler une exploitation mixte d'élevage laitier réalisant un peu de cultures de vente. L'ensemble des flux d'azote sous leurs principales formes est représenté dans le schéma avec en bleu les entrées d'azote dans le système, en orange les flux d'azote exportés par les produits de l'exploitation et en jaune les flux rejetés vers l'environnement, les flux internes étant en vert. Il est souvent intéressant d'étudier les variabilités interannuelles de ces flux qui s'avèrent parfois très fortes. Ces variations sont notamment liées au climat, dont les effets peuvent être directs, comme l'effet de la lame draînante hivernale sur le lessivage des nitrates, mais aussi indirects, notamment suite aux modifications flexibles de la conduite pour s'adapter. En effet, les variations d'utilisation des stocks d'aliments et d'effluents ont des répercussions sur l'assolement et sur les cultures de ventes ou encore sur le plan de fumure qui peuvent affecter les pertes vers l'environnement au cours de l'année qui suit ces variations. MELODIE permet également d'étudier le lien entre des indicateurs environnementaux et les pertes vers l'environnement en fonction des années et des systèmes afin d'en évaluer la pertinence ou d'en préciser les limites et les usages.

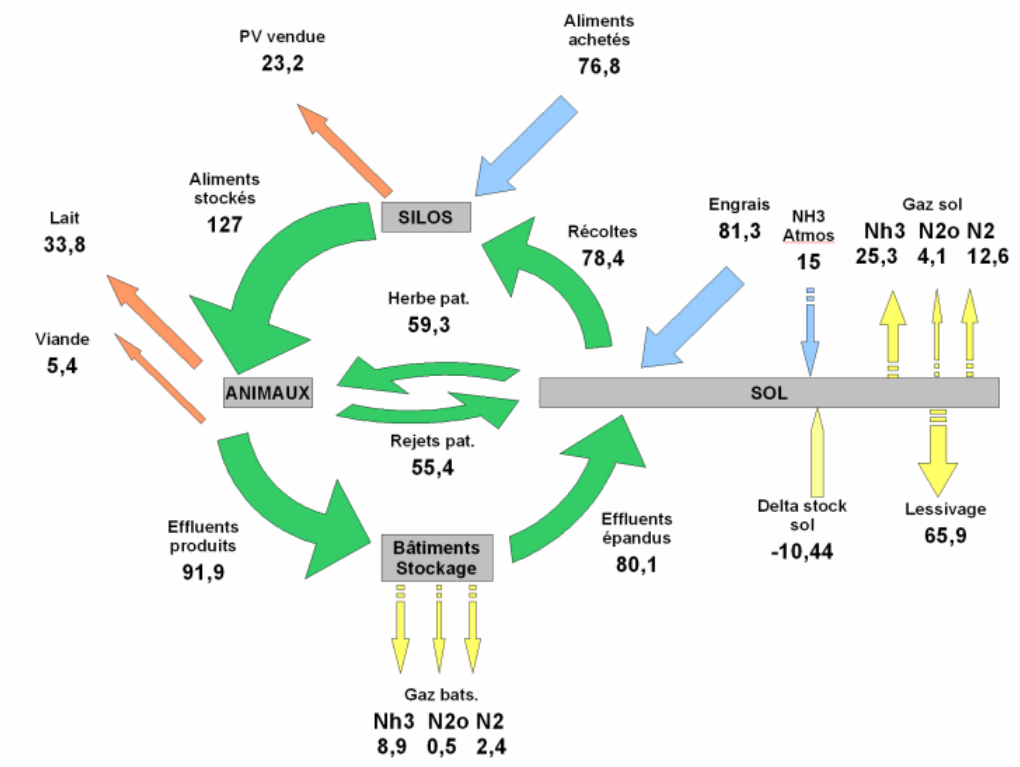

Figure 6 : Exemple de bilan annuel du cycle de l'azote (exprimé en kg de N/ha) au sein d'une exploitation simulé par MELODIE pour une exploitation laitière avec 70% à 80% de la SAU en surfaces fourragères avec un système d'alimentation maïs/herbe.

Cette richesse des sorties de MELODIE en fait réellement une plateforme d'expérimentation virtuelle pour mieux comprendre les processus qui peuvent conduire aux résultats observés et faire le lien entre les modifications de pratiques et les performances environnementales observées. La prise en compte détaillée des aspects décisionnels dans ces processus est une spécificité très intéressante de MELODIE.

Conclusion et perspectives

MELODIE est un véritable simulateur d'exploitation agricole rendu possible par l'association des modèles biotechniques et décisionnels. Il utilise un ensemble de modèles préexistants pour les animaux, les systèmes sols-culture et les effluents qui sont couplés dans une structure générique bâtie

sur une représentation orientée objet. Grâce à ce changement de niveau d'organisation, MELODIE est un cadre générique pour l'expérimentation virtuelle sur les systèmes d'élevage. Il permet à l'utilisateur de disposer d'une évaluation multi-critères *ex ante* des différentes pressions environnementales liées aux systèmes de production. Ces évaluations sont complémentaires des approches par expérimentation ou par enquêtes.

Les applications potentielles de MELODIE sont nombreuses. Il a été utilisé dans le cadre du projet ANR SPA/DD pour comparer différents systèmes de bâtiments de porcs et de traitements des effluents (lisier, méthanisation, traitement biologique, compostage du lisier sur paille ou engraissement des porcs sur litière paillée) pour en évaluer les conséquences sur les émissions. Ces émissions ont été comparées à l'aide d'une analyse de cycle de vie pour évaluer l'ensemble des émissions directes et indirectes des différents systèmes. Dans le cadre d'un projet CASDAR sur les systèmes laitiers, différents types d'exploitations laitières avec des systèmes d'alimentation contrastés sont comparés pour évaluer l'ensemble des émissions des différents systèmes. Enfin, dans le cadre du projet ANR ACASSYA, MELODIE prend une dimension spatiale en se couplant avec le modèle TNT pour simuler le fonctionnement de l'azote sur l'ensemble d'un bassin versant. Dans ce projet, 120 exploitations du bassin versant vont être simulées avec leur logique propre à partir des données d'enquête pour situer l'ensemble des actions et l'utilisation des parcelles au sein du bassin versant. Le modèle TNT va permettre de suivre les flux d'azote ainsi générés depuis chaque surface élémentaire du bassin versant et jusqu'à l'exutoire. Différents scénarios seront ensuite simulés pour étudier leur impact sur la qualité des eaux du bassin versant et sur les émissions associées. Ce projet de modélisation est réalisé en utilisant la plateforme INRA Record de modélisation afin de faciliter le couplage des modèles (Bergez et al, 2009). Il devrait permettre de faire le lien entre les systèmes de production, leurs pratiques et les impacts attendus vers la qualité des eaux en fonction des capacités de résilience et de tampon du territoire.

MELODIE constitue donc une première plateforme évolutive de modélisation d'une exploitation agricole. Un certain nombre de fonctionnalités prévues ne sont pas encore disponibles faute de modèles adaptés (pertes de phosphore au niveau des parcelles) ou de paramétrage de données (temps de travaux, consommations d'énergie…). Des couplages avec des modèles micro-économiques et des indicateurs d'impacts plus globaux (Analyse de cycle de vie) sont prévus pour mieux évaluer encore les systèmes. A terme, cette approche doit ainsi permettre de mieux objectiver les liens qui peuvent exister entre d'une part les systèmes d'élevage et leurs pratiques et d'autre part leurs performances de production et leurs impacts sur l'environnement.

Remerciements : Ce programme de recherche a été réalisé avec le soutien financier de l'ANR (Agence Nationale de la Recherche), dans le cadre du programme Agriculture et Développement Durable, Projet n° ANR-06-PADD-017, Système de production Animale et Développement Durable (SPA/DD).et du CASDAR pour le projet « Construction d'un modèle dynamique caractérisant les impacts environnementaux des exploitations d'élevage ».

Références bibliographiques

Bergez J.E., Chabrier P., Garcia F., Gary C., Makowski D., Quesnel G., Ramat E., Raynal H., Rousse N., Wallach D., 2009. RECORD: a new software platform to model and simulate cropping systems", FARMING SYSTEM DESIGN, Monterey CA.

Brisson N., Gary C., Justes E., Roche R., Mary B., Ripoche D., Zimmer D., Sierra J., Bertuzzi P., Burger P., 2003. An overview of the crop model STICS. European Journal of Agronomy 18, 309-332.

Chardon, X., Le Gall, A., Raison, C., Morvan, T., Faverdin, P., 2008. FUMIGENE: a model to plan the allocation of agricultural wastes at the farm level. Journal of Agricultural Science Cambridge 146, 521-539.

Chardon X., Rigolot C., Baratte C., Le Gall A., Espagnol S., Martin-Clouaire R., Rellier J.P., Raison C., Poupa J.C., Faverdin P. 2007. MELODIE : a whole-farm model to study the dynamics of nutrients in integrated dairy and pig farms. In: Oxley L., Kulasiri, D. (Eds) International Congress on Modelling and Simulation (MODSIM) ; 2007/12/10-13 ; Christchurch (NZL). MODSIM 2007 International Congress on Modelling and Simulation.(NZL) : Modeling and Simulation Society of Australia and New Zealand ; 2007, 1638-1645.

Chardon X., Rigolot C., Baratte C., Martin-Clouaire R., Rellier J.P., Raison C., Le Gall A., Dourmad J .Y., Poupa J.C., Delaby L., Morvan T., Leterme P., Paillat J.M., Espagnol S., Faverdin P. 2007. A whole farm model to simulate the environmental impacts of animal farming systems : MELODIE. In: D. Sauvant, J. Van Milgen, P. Faverdin and N. Friggrens (Eds) Modelling nutrient digestion and utilisation in farm animals. Wageningen Academic Publishers, Wageningen, Netherlands, 403-411.

Coquil X., Faverdin P., Garcia F., 2005. Dynamic modelling of dairy herd demography. Rencontres Recherche Ruminants, 12, 213.

Garcia F., Faverdin P., Delaby L., Peyraud J.-L., 2005. Tournesol: a model to simulate cropping plans in dairy production systems. Rencontres Recherche Ruminants 12, 195-198.

INRA, 2007. Alimentation des bovins, ovins et caprins: besoins des animaux - valeurs des aliments. Tables Inra 2007, Eds Quae, Paris, France.

Jacobsen B.H., Petersen B.M., Berntsen J., Boye C., Sørensen C.G., Søgaard H.T., Hansen J.P., 1998. An integrated economic and environmental farm simulation model (FASSET). Danish Institute of Agricultural and Fisheries Economics, Copenhagen, Denmark.

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

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

Maxin G., 2006. Modélisation des bilans Entree/Sortie des éléments carbone, azote, eau et minéraux chez la vache laitière. Rapport d'ingénieur, ESITPA, Rouen, France.

Payraudeau S., van der Werf H.M.G., 2005. Environmental impact assessment for a farming region: a review of methods. Agriculture, Ecosystems & Environment 107(1), 1-19.

Rotz C. A., Coiner C.U., 2004. The integrated farm system model: reference manual. Available from: www.ars.usda.gov/Main/docs.htm?docid=8519.

Schils R.L.M., de Haan M.H.A., Hemmer J.G.A., van den Pol-van Dasselaar A., de Boer J.A., Evers A.G., Holshof G., van Middelkoop J.C., Zom R.L.G., 2007. Dairywise, a whole-farm dairy model. Journal of Dairy Science 90(11), 5334-5346.

Steinfeld H., Gerber P., Wassenaar T., Castel V., Rosales M., de Haan C.. 2006. Livestock Long Shadow, environmental issues and options. FAO Rome, ISBN 978-92-5-105571-7, 390 pp.

Wastney M. E., Palliser C.C., Lile J.A., McDonald K.A., Penno J.W., Bright K.P., 2002. A whole-farm model applied to a dairy system. Proceedings of the NZSAP 62, 120-123.