

Adaptation des systèmes d'élevage bovins au changement climatique :

intérêts, limites et perspectives des approches de modélisation

A.-I. Graux¹, J.-C. Moreau², H. Raynal³, F. Ruget⁴, P. Carrère¹, P. Faverdin⁵, D. Hill⁶

1 : INRA, UR874 Ecosystème prairial, 5, chemin de Beaulieu, F-63039 Clermont-Ferrand

2 : Institut de l'élevage, Campus INRA, Chemin de Borde Rouge, F-31321 Castanet-Tolosan

3 : INRA, Chemin de Borde Rouge, F-31321 Castanet-Tolosan

4 : INRA UMR 1114 EMMAH, Site Agroparc, F-84914 Avignon cedex 9

5 : INRA, UMR 1348 Physiologie, Environnement et Génétique pour l'animal et les systèmes d'élevage, Domaine de la Prise, F-35590 Saint-Gilles

6 : ISIMA/LIMOS UMR CNRS 6158 - Université Blaise Pascal, BP 10125, F-63173 Aubière cedex

Résumé

Cet article se propose de faire une synthèse des principales approches de modélisation développées par la Recherche pour étudier les possibilités d'adaptation des systèmes d'élevage au changement climatique par des interventions techniques aux échelles de la parcelle et du système fourrager. A l'échelle de la parcelle, des modules de gestion de la fertilisation azotée, de l'irrigation et de l'exploitation de l'herbe par les modèles permettent d'adapter l'itinéraire technique des parcelles cultivées au contexte pédoclimatique. Il est également possible de comparer l'intérêt de différents génotypes ou variétés culturales ainsi que différentes prairies multispécifiques. A l'échelle du système fourrager, il est possible de raisonner le dimensionnement des surfaces en fauche et en pâture, dans le cas de systèmes herbagers et d'adapter le calendrier d'alimentation des troupeaux. Les limites actuelles de ces approches ainsi que les perspectives permettant à l'avenir d'améliorer leur vraisemblance, leur pertinence et leur facilité de mise en œuvre, et de porter la réflexion à l'échelle du système d'élevage et du territoire, sont discutées.

Introduction

Le climat est généralement décrit au travers de l'évolution de différentes variables que sont la température, les pluies, le rayonnement, l'humidité de l'air et la vitesse du vent. Le climat varie naturellement dans le temps et dans l'espace, sous l'influence des circulations atmosphériques et océaniques, du rayonnement solaire, et des éruptions volcaniques. La variabilité climatique fait référence aux variations du climat autour d'un état moyen. Elle se traduit par des événements climatiques sévères, dits extrêmes, tels que les sécheresses et les vagues de chaleur, c'est-à-dire des événements dont l'intensité est rare en regard du moment de l'année ou de l'endroit où ils interviennent. Dans la mesure où ces événements sont difficilement prévisibles, on parle d'aléas climatiques. Aujourd'hui, **le système climatique évolue en dehors des limites naturelles de son état moyen et de sa variabilité**, tels qu'observés sur les derniers millénaires. Nous sommes sur une trajectoire de réchauffement rapide, qui s'accompagne notamment d'une **augmentation de la fréquence, de la sévérité et de la distribution des aléas dans l'année** (SOUBEYROUX *et al.*, 2011). Le changement climatique est susceptible de provoquer une **modification de la saisonnalité de la production fourragère**. De **nouvelles opportunités** pourraient s'offrir **au printemps** (sous condition d'une disponibilité suffisante des ressources en eau) **et en hiver**, à la condition que les sols soient suffisamment portants. *A contrario*, les régions appelées à être fortement arides pourraient enregistrer des **déficits fourragers accrus en été** (GRAUX *et al.*, 2013a). En outre, l'augmentation de la variabilité climatique devrait s'accompagner d'une **augmentation de la variabilité interannuelle de la production** (GRAUX *et al.*, 2013a). **Les systèmes d'élevage sont fortement sensibles** à ces changements (MOSNIER *et al.*, 2012) qui peuvent entraîner un **déséquilibre entre l'offre et la demande fourragère**. L'**été 2003**, particulièrement chaud et sec, a provoqué en France un déficit de production fourragère de l'ordre de -30% (CIAIS *et al.*, 2005). Cela laisse présager des conséquences néfastes de tels épisodes pour l'avenir, si ces derniers étaient amenés à avoir lieu plus fréquemment et être plus sévères. Trouver des voies d'adaptation des systèmes d'élevage à ces changements climatiques est complexe, dans la mesure où ces systèmes assurent de nombreux services (par ex. HERVIEU, 2002), au-delà du seul service de production de biomasse végétale, support lui-même à la production de la viande et du lait que nous consommons. En effet, les surfaces en prairie participent à la gestion et à l'entretien des territoires, à la conservation de la biodiversité et à la réduction des émissions gaz à effet de serre (GES) à laquelle s'est engagée la France, en séquestrant une partie du carbone atmosphérique dans les sols.

L'adaptation de ces systèmes repose sur la capacité des systèmes biologiques (prairies, cultures, herbivores) **à s'adapter**, et **sur celles des éleveurs à anticiper et/ou à compenser les conséquences négatives du changement climatique et notamment des aléas**, en exploitant au mieux les potentialités de leur système. La première stratégie (**adaptation tactique à court terme**) repose sur des **ajustements de la gestion annuelle et saisonnière** du système d'élevage en fonction de l'évolution climatique subie. L'éleveur peut par exemple jouer sur l'ordre d'utilisation des parcelles en prairie (diversité de précocité et de potentiel de production) et sur les reports de stocks sur pieds. D'autres ajustements sont également permis par les capacités adaptatives des animaux (croissance compensatrice des génisses etc.) et par la baisse temporaire des besoins alimentaires du troupeau (monotraite, sevrage précoce, tarissement précoce, anticipation des ventes d'animaux etc.). Pour compenser la pénurie estivale de fourrages, l'éleveur peut également avoir recours aux stocks de fourrages de l'exploitation et/ou à l'achat de fourrages et/ou de concentrés, et étendre en contrepartie la période de pâturage en fin d'automne et en hiver, sous condition de sols suffisamment portants. Il peut également mettre en place des cultures dérobées, par exemple après une céréale, pour pallier au manque de fourrages. La seconde stratégie (**adaptation stratégique à long terme**) vise à **intégrer les conséquences possibles du changement climatique et notamment des aléas dans la conception du système d'élevage**. Cette stratégie peut s'appuyer, par exemple, sur le choix du type de production animale et de la période de vêlage, sur la définition de l'assolement et du chargement annuel de l'exploitation. Le plus souvent, l'éleveur fait appel à ces deux types de stratégies pour adapter son système. Toutefois, plusieurs travaux ont montré que **les adaptations sont spécifiques aux systèmes fourragers étudiés** (par ex. ANDRIEU *et al.*, 2004 ; DEDIEU *et al.*, 2008).

Dans les **systèmes fourragers avec cultures**, l'adaptation repose sur le choix des cultures fourragères ainsi que sur le dimensionnement des surfaces. Il est ainsi suggéré d'élargir la panoplie des fourrages cultivés au-delà du couple maïs-herbe et de trouver des alternatives au maïs telles que

les céréales immatures ou le sorgho (par ex. GOMAS, 2008). L'éleveur a également la possibilité de faire varier entre années les surfaces ensemencées en prairie et en culture fourragère annuelle, et parmi les surfaces en prairie, de jouer sur la part de surfaces pâturées et fauchées. Dans les **systèmes exclusivement herbagers**, les leviers de sécurisation reposent principalement sur les reports de stocks de fourrages conservés d'une année sur l'autre, et dans une moindre mesure sur l'ordre d'utilisation des parcelles de prairie (par ex. MOREAU *et al.*, 2008). Un autre levier de sécurisation possible consiste en un pâturage surdimensionné, qui assure une ingestion d'herbe suffisante tout en simplifiant le travail mais nécessite des pratiques de rattrapage pour garantir une bonne qualité de l'herbe offerte (DOBREMEZ *et al.*, 2008). Certaines associations graminées - légumineuses (par ex. dactyle - luzerne) offrent également des capacités de résilience élevées face aux épisodes de sécheresse sévères (MOREAU *et al.*, 2008).

La modélisation devient incontournable lorsqu'il s'agit d'étudier sur des pas de temps longs les impacts du changement climatique sur les systèmes d'élevage, ainsi que les conséquences de scénarios d'adaptation sur la production de ces systèmes et l'environnement (SOUSSANA *et al.*, 2010). Pour appréhender les possibilités d'adaptation des systèmes d'élevage au changement climatique, deux types d'« expérimentation virtuelle » sont classiquement employés. Le premier consiste à **définir ex-ante différents scénarios d'adaptation à simuler** avec le modèle, puis à comparer les avantages sur un plan agro-environnemental de ces scénarios à partir des sorties du modèle. La seconde solution consiste à **construire et à implémenter dans le modèle des règles de conduite** dépendantes des conditions pédoclimatiques rencontrées, **le modèle simulant ex-post une conduite sensible à l'état du système** dans différentes situations pédoclimatiques, ainsi que les conséquences associées pour l'environnement et la production.

Cet article se propose de faire une **synthèse des principales approches de modélisation actuellement développées par la Recherche** pour étudier et évaluer les possibilités d'adaptation des systèmes d'élevage au changement climatique. Nous n'abordons pas ici la modélisation des systèmes d'élevage en réponse aux contraintes des marchés, des politiques publiques et de la société. Cet article se concentre sur deux types principaux de modèles : ceux destinés à accroître notre compréhension des mécanismes et des fonctionnements (modèles de recherche) et ceux destinés à tester des scénarios et dont les sorties sont des supports de médiation entre acteurs de la Recherche et acteurs de terrain (modèles d'étude) pouvant être mobilisées pour instruire les politiques publiques. En partant d'une analyse des modèles existants, nous identifierons les problématiques de recherche que nous sommes actuellement en mesure de traiter (niveau de compréhension des systèmes, évaluation des incertitudes) de celles qui restent encore de notre point de vue à développer (front de recherche). Nous brosserons les perspectives d'amélioration de la vraisemblance, de la pertinence et de la facilité de mise en œuvre de ces modèles, afin de pouvoir étudier des niveaux plus intégratifs que soit aux échelles spatiales, temporelles et institutionnelles (JACKSON *et al.*, 2010).

1. Modéliser le fonctionnement des prairies et des cultures fourragères

Deux modèles français, PaSim et STICS, ont été choisis pour illustrer les adaptations simulées à l'échelle de la parcelle, voire du système fourrager. Il s'agit de deux **modèles à compartiments, dynamiques déterministes et à dominante mécaniste**¹. STICS permet de simuler des rotations culturales incluant différentes cultures fourragères alors que PaSim ne permet que de simuler des prairies permanentes ou semées (mais non intégrées dans une rotation incluant des cultures fourragères autres que la prairie). Ces modèles sont impliqués dans de nombreux projets de recherche français, mais également dans des projets européens et internationaux, et ont déjà été utilisés dans des études de changement climatique telles que le projet CLIMATOR (BRISSEON et LEVRAULT, 2010). Des exemples de comparaison d'itinéraires techniques sous changement climatique sont disponibles dans GRAUX *et al.* (2013a) et RUGET *et al.* (2012a) pour PaSim et STICS,

¹ Modèle qui utilise généralement un ensemble d'équations différentielles fonctions du temps, dont les prédictions ne reposent pas sur des distributions de probabilité, et qui fournit un certain degré de compréhension et d'explication des mécanismes modélisés.

respectivement. Après une description succincte de ces modèles, nous décrivons les modules de gestion de l'itinéraire technique par les modèles permettant de raisonner l'adaptation des pratiques à cette échelle, ainsi que les possibilités offertes par la généralité des modèles.

1.1. PaSim, modèle de simulation des prairies

PaSim² (version 5.3, IDDN.FR.001.220024.000.R.P.2012.000.10000) est un **modèle biogéochimique de simulation du fonctionnement des prairies au pas de temps horaire**, initialement développé par RIEDO *et al.* (1998) et inspiré du Hurley Pasture Model de THORNLEY (1998). Il représente les **flux de matière** (matière sèche, C, N, eau) et **d'énergie** au sein du **système sol-végétation-animal** en réponse **au contexte pédoclimatique** et à la **conduite des prairies**. Ce fonctionnement est simulé pour une ou plusieurs années climatiques enchainées, et prend en compte les pratiques de fertilisation minérale ou organique, d'irrigation, de retournement du sol³ et d'exploitation de l'herbe par la fauche et/ou le pâturage. PaSim permet de simuler les **performances animales** (production laitière, croissance, état corporel) de vaches laitières ou allaitantes et de génisses **au pâturage**, ainsi que les **émissions de méthane entérique** associées (GRAUX *et al.*, 2011). Les vaches laitières peuvent être complémentées au pâturage par des fourrages et/ou des concentrés. La **végétation est représentée par une plante moyenne** composée d'un compartiment racinaire et de trois compartiments aériens (limbes, tiges et gaines, épis), déclinés chacun en 4 sous-compartiments d'âges différents.

Le **carbone** assimilé par photosynthèse est alloué dynamiquement aux compartiments de la plante et peut sortir du système par respiration de l'écosystème et par production de méthane entérique par les herbivores, ainsi que *via* les exportations liées à la fauche et à la production de lait. L'**azote** est apporté au sol *via* la déposition d'ammoniac, l'apport de fertilisants azotés minéraux et/ou l'épandage d'effluents organiques, la fixation d'azote symbiotique par les légumineuses, les restitutions animales au pâturage ainsi que par la minéralisation de l'azote organique. L'azote minéral du sol disponible pour la croissance de la végétation par absorption racinaire, peut être réduit par immobilisation microbienne, par lixiviation, par volatilisation de NH₃, et *via* les processus de nitrification/dénitrification qui conduisent à la production de N₂O. L'eau apportée par les pluies et/ou l'irrigation alimente la réserve du sol. Le calcul des **flux d'eau dans le sol** s'appuie sur une compartimentation en différents horizons et une représentation des flux d'infiltration et de remontées capillaires entre horizons. L'eau qui n'est pas perdue par ruissellement et/ou par évaporation peut-être extraite par les racines sous l'effet de la transpiration. L'eau en excès au niveau de l'horizon de sol le plus profond peut être perdue par drainage.

1.2. STICS, modèle générique de simulation des cultures fourragères

STICS⁴ est un **modèle générique semi-mécaniste de simulation du fonctionnement des cultures annuelles** (dont les grandes cultures) **ou pérennes** (dont les prairies) **au pas de temps journalier**. Il a été construit dans le but de **simuler les conséquences des variations du milieu** (contexte pédoclimatique) et **du système de culture** (variété, itinéraire technique) **sur la production** (qualité et quantité) d'une parcelle agricole et **sur l'environnement**. STICS constitue aussi un **outil de diagnostic agronomique**, en rendant compte des pratiques les plus courantes: fertilisation, irrigation, ainsi que des pratiques plus spécifiques comme les fauches.

Une description des **concepts fondamentaux de STICS** est disponible dans BRISSON *et al.* (2003). Les **principaux processus** simulés sont la **croissance** en biomasse et en surface, la **phénologie** des cultures ainsi que les **bilans hydriques et azotés**. Ces derniers permettent d'estimer le **drainage** et la **lixiviation du nitrate**. Le modèle permet également d'estimer les émissions de CO₂ liées à la respiration du sol, ainsi que les émissions de N₂O associées aux processus de nitrification et

² Pasture simulation model

³ Uniquement sur l'accélération de la décomposition de la matière organique du sol

⁴ Simulateur multidisciplinaire pour les cultures standard

dénitrification. La **phénologie de la culture** est pilotée par un calendrier qui dépend principalement de la température, et éventuellement des effets de la photopériode et de la vernalisation. La **production de matière sèche** est simulée par conversion du rayonnement intercepté par la culture. Cette matière sèche est répartie entre organes (feuilles, tiges, grains) et au sein des organes, entre les composés structuraux et les réserves, en fonction du stade phénologique de la culture. L'**indice foliaire** (LAI, surface foliaire rapportée à l'unité de surface de sol) est utilisé comme indicateur de la croissance en surface du couvert. Il est, tout comme les racines, mis en place et détruit essentiellement en fonction de la température. Les **besoins en eau de la culture** sont estimés à partir de l'évapotranspiration potentielle (introduite en entrée ou calculée par le modèle) et du LAI de la culture. La satisfaction de ces besoins dépend de l'humidité du sol et de la colonisation du profil par les racines. Lorsque l'humidité du sol passe en dessous d'un seuil, la transpiration de la plante est réduite, ce qui affecte principalement la fabrication de feuilles (LAI) et la production de matière sèche. L'estimation des **besoins en azote de la culture** repose sur l'indice de nutrition azotée (INN⁵) défini par LEMAIRE et SALETTE (1984). La confrontation entre l'azote disponible du sol et la demande de la plante permet de calculer un indice de stress azoté qui réduira la croissance et la sénescence du couvert. Les sources d'azote pour la culture sont la fertilisation minérale et organique (engrais verts, résidus, mulchs, organes sénescents), ainsi que la minéralisation de la matière organique stable (humus).

2. La modélisation comme démarche d'évaluation des voies d'adaptations du système fourrager au changement climatique

2.1. Adaptations de l'itinéraire technique

Des modules de gestion de la fertilisation azotée, de l'irrigation, de l'exploitation de l'herbe (fauche, pâturage) par les modèles existent, et permettent d'adapter l'itinéraire technique des parcelles cultivées.

– Fertilisation azotée et irrigation

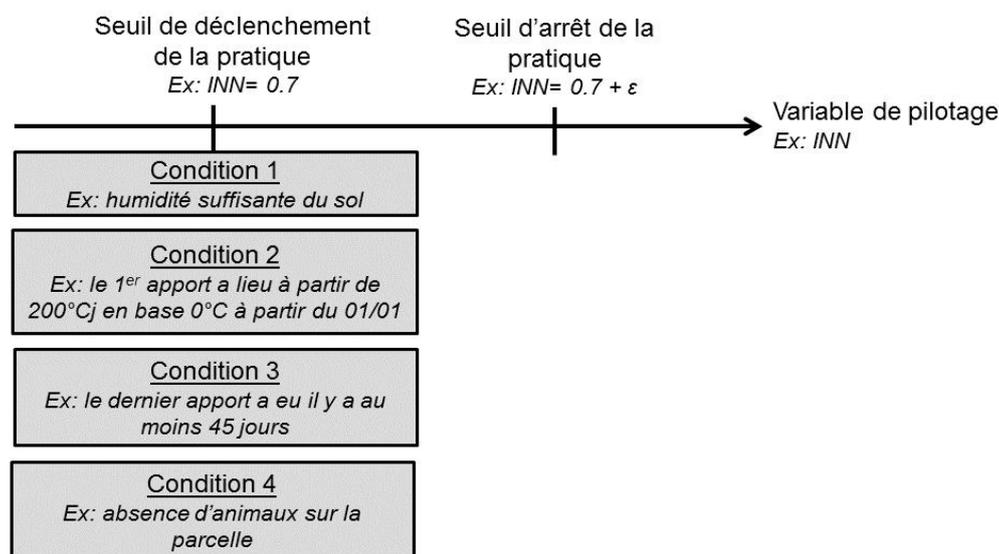
Dans les modèles STICS et PaSim, les dates d'apports et les quantités d'engrais azotés minéraux peuvent être gérés par le modèle. Cette gestion repose sur l'indice de nutrition azoté (INN). Dans ces deux modèles, un apport d'engrais se déclenche automatiquement lorsque l'INN descend en dessous d'un seuil fixé par l'utilisateur (ex : INN = 0,7, Figure 1). Dans STICS, l'apport n'est fait que si, en outre, la demande de la plante est suffisante. Dans ces deux modèles, les apports sont conditionnés par un **test d'humidité du sol**. Dans PaSim, le premier apport ne peut avoir lieu qu'à partir de 200°Cj (base 0°C) depuis le 1^{er} janvier, et les apports suivants que si le dernier apport est intervenu il y a au moins 45 jours. Si le modèle pilote en parallèle le pâturage, le modèle ne peut pas fertiliser lorsque les animaux sont présents sur la parcelle. En outre, l'utilisateur peut paramétrer le **nombre maximum d'apports annuels**. Dans PaSim, la quantité apportée chaque jour correspond à la **quantité nécessaire pour optimiser la concentration en azote** dans la plante. Cette quantité est **toutefois limitée** : elle est bornée par une quantité minimale (ex. : 30 kg N/ha) et une quantité maximale (ex. : 110 kg N/ha). Dans STICS, cette **quantité** est **fixe** et déterminée préalablement par l'utilisateur. Dans les 2 modèles, la **fertilisation s'arrête lorsque l'INN redevient supérieur au seuil + ε** (ε petit). **En l'absence d'adaptation** des pratiques de fertilisation et de la composition des prairies multispécifiques, le **changement climatique pourrait s'accompagner d'un déséquilibre azoté des fourrages** produits à partir de l'herbe, déséquilibre qui pourrait nécessiter des apports supplémentaires en azote (GRAUX *et al.*, 2013a).

La conduite de l'**irrigation** y est simulée de la même manière que celui de la fertilisation. Dans PaSim, la variable de pilotage est l'indice de stress hydrique (f_w) limitant la photosynthèse, et dans STICS, l'indice de stress hydrique stomatique (swfac) limitant la production primaire. **Une irrigation est déclenchée par le modèle lorsque cet indice de stress descend en dessous d'un seuil** fixé par l'utilisateur et qui représente le degré de satisfaction des besoins en eau de la prairie ou de la culture. La quantité d'eau apportée correspond au volume d'eau nécessaire pour **remplir le sol à sa capacité au champ**. Cette quantité doit être supérieure à une **quantité minimale** (dans PaSim

⁵ Ratio de la concentration en azote simulée sur la concentration critique en azote dans les parties aériennes.

seulement, ex : 20 mm) et inférieure à une **quantité maximale** (ex : 40 mm) définies par l'utilisateur, de manière à éviter les irrigations inutiles et/ou irréalistes. **L'irrigation s'arrête lorsque l'indice de stress hydrique redevient supérieur au seuil défini** en entrée + ε (ε petit) ; dans PaSim, seulement 10 irrigations sont possibles. GRAUX *et al.* (2013a) ont montré que **l'irrigation des prairies pourrait permettre de soutenir la production estivale dans le futur mais au détriment de la recharge des nappes souterraines**, déjà affectée par l'accentuation des conditions d'aridité dans le futur lointain (2070-2099) (sous l'hypothèse que l'eau d'irrigation provienne des nappes).

FIGURE 1 – Exemple de modélisation d'une pratique à l'échelle parcellaire.



– Fauches et pâturage

Dans **PaSim**, les **fauches** sont fonction de la croissance de la plante et ont lieu tous les 30 jours ou plus. La première fauche a lieu après le stade épi 10 cm. Après 30 jours de repousse, une nouvelle fauche est déclenchée par le modèle lorsque le taux de croissance moyen de la prairie depuis le début de la repousse décline et si les 3 jours qui précèdent la fauche n'ont pas été arrosés. En outre, la fauche n'est possible que si la biomasse récoltable excède un seuil fixé en entrée par l'utilisateur. Dans **STICS**, les **dates de fauche** peuvent être exprimées en date calendaire ou en somme de températures, cette dernière option permettant de les adapter au climat local ainsi qu'à son évolution avec le changement climatique. Dans ces deux modèles, la fauche n'est réalisée que **si la biomasse d'herbe sur pied dépasse un seuil** défini par l'utilisateur. Sous l'effet du réchauffement du climat, ce mode de renseignement des dates de fauche chez **STICS** conduit à une **plus grande précocité de la première coupe** ainsi qu'à une **augmentation du nombre de coupes**, sans réduire la production (RUGET *et al.*, 2012a). Les simulations réalisées avec **PaSim** sous changement climatique, dans le cas de prairies de moyenne montagne dont la fauche et la fertilisation sont simulées par PaSim, montrent, dans le **futur lointain** (2070-2049), une **plus grande précocité** (de l'ordre d'un mois) des première et deuxième coupes et la **possibilité d'une coupe supplémentaire** dans l'année (GRAUX *et al.*, 2013b). Dans le **futur proche** (2020-2049), le nombre et les dates des coupes ne varient pas sensiblement.

Pour simuler le pâturage, STICS simule en réalité une fauche qui prélève une quantité limitée et fixe d'herbe sur une période donnée. La variabilité journalière et intra-saisonnière des prélèvements des animaux au pâturage ainsi que les effets de leurs restitutions au pâturage ne sont donc pas pris en compte par ce modèle. Dans **PaSim**, le **pâturage est simulé de manière explicite**. L'ingestion d'herbe au pâturage est calculée en proportion de l'ingestion volontaire à l'auge, en prenant en compte l'effet des facteurs limitants de l'ingestion liés à la gestion du pâturage. Ce critère est utilisé pour avoir une idée de la satisfaction des besoins des animaux par l'herbe offerte. En l'absence de gelées, les animaux sont mis à l'herbe quand **la production d'herbe satisfait un certain pourcentage des besoins de l'animal**, et le pâturage s'arrête quand elle descend sous ce même seuil. Un délai de 15 jours minimum est imposé entre deux périodes de pâturage consécutives.

2.2. Choix de cultures fourragères adaptées

Au-delà de l'adaptation de l'itinéraire technique permise par les règles de gestion implémentées dans les modèles, il est également possible de **comparer avec STICS le comportement de différents géotypes ou variétés culturales** de maïs et de graminées. Il sera bientôt possible de **comparer avec PaSim différents types fonctionnels de prairies permanentes** (tels que définis par CRUZ *et al.*, 2010). Outre le fait de simplifier le paramétrage de la végétation avec PaSim, l'intégration de ces types fonctionnels de prairie pourrait permettre d'étudier l'intérêt de la diversité des prairies permanentes multisécifiques présentes dans l'exploitation (en termes de précocité, de potentiel de production, *etc.*) pour s'adapter au changement climatique. A titre d'exemple, l'**intérêt de géotypes de maïs plus tardifs** combinés à une avancée des dates de semis a ainsi été montré pour faire face au raccourcissement de cycle induit par l'augmentation des températures (RUGET *et al.*, 2012a). De même, l'**intérêt** de la luzerne, et plus largement **des légumineuses résistantes à la sécheresse**, a été montré pour **s'adapter au déficit azoté croissant** induit par le changement climatique, vis-à-vis des graminées fourragères qui nécessitent un apport d'azote supplémentaire (RUGET *et al.*, 2012a). Une **comparaison du maïs et du sorgho** a également été conduite dans le cadre du projet CLIMATOR. Elle montre que le sorgho, s'il était irrigué ou bien s'il bénéficiait d'une implantation sur sol profond, pourrait atteindre dans le futur une productivité proche de celle du maïs tout en étant plus économe en eau et moins sensible au déficit hydrique.

2.3. Adaptation du dimensionnement des surfaces en fauche et pâture

On s'intéresse ici à des **systèmes exclusivement herbagers**. Une procédure en deux étapes a été développée (GRAUX *et al.*, 2013b) qui repose sur PaSim et qui **prend en compte l'utilité des reports de stocks** (ici sur 2 ans) et le **dimensionnement des surfaces allouées au pâturage comme leviers d'adaptation au changement climatique**. Les surfaces pâturées d'une part, et fauchées d'autre part, sont supposées homogènes en termes de végétations et de sols. Ces deux types de surfaces sont représentés très grossièrement par deux parcelles, l'une fauchée, l'autre pâturée. On fait également l'hypothèse que l'éleveur cherche à maximiser le chargement global annuel de son système (D, en UGB/ha SFP) et qu'il conçoit son système sur l'espérance du rendement fourrager (Y_m) d'après les i dernières années (ex : $i = 10$).

La **première étape** de la procédure consiste à **simuler le rendement fourrager (Y) des surfaces fauchées** pour chacune des années de la série climatique simulée (ex : 1950-2100). Y est estimé **en laissant le modèle piloter** en parallèle la fauche et la fertilisation minérale azotée de ces surfaces (cf. la partie 2.1). On calcule sur cette base Y_m pour l'année (n) comme la moyenne des valeurs de Y des i précédentes années : (n-i) à (n-1). Pour une série climatique allant de 1950 à 2100, si $i = 10$, on dispose donc à la fin de cette étape de valeurs d' Y_m de 1960 à 2100.

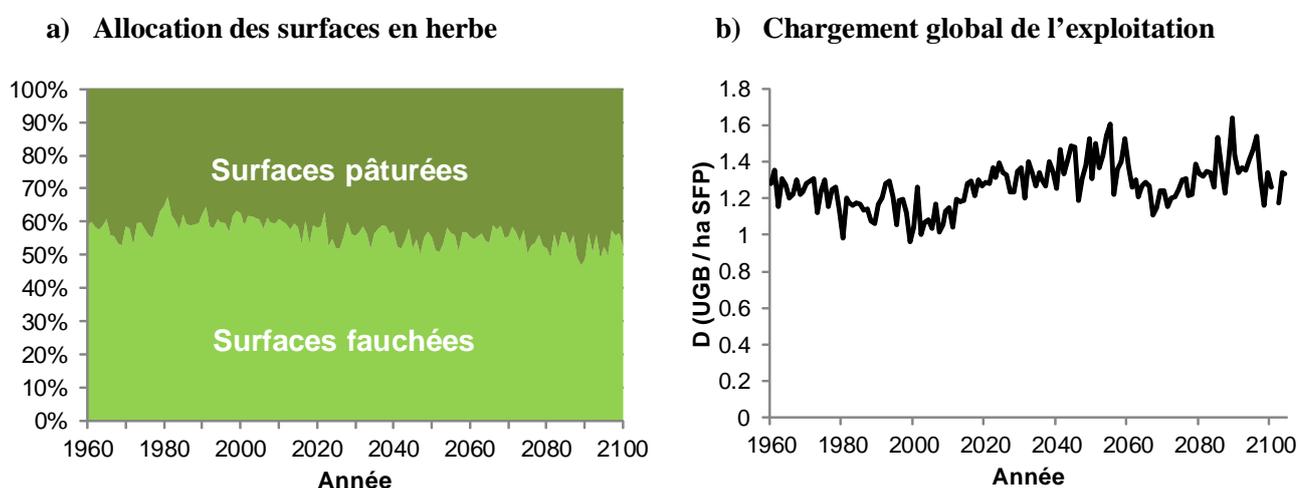
La **seconde étape** consiste ensuite à **simuler les surfaces pâturées**, pour lesquelles le modèle pilote la fertilisation minérale et le pâturage (entrée-sortie des animaux de la parcelle, cf. la partie 2.1.). Le modèle effectue des itérations de chacune des années de la série climatique (1 itération = 1 répétition de l'année). A chacune de ces itérations, il incrémente le chargement par ha de prairie pâturée (S, supposé constant au sein de l'année). A la fin de chacune de ces itérations, le modèle connaît ainsi le nombre de jours passés à l'étable (N_b) et au pâturage (N_p) par les animaux. Il peut donc en déduire les besoins en fourrages conservés pour nourrir les animaux à l'étable ($X = N_b \times CI \times S$), avec CI la capacité d'ingestion (supposée constante) des animaux à l'étable. Connaissant X et Y_m , le modèle peut calculer la **proportion de surfaces pâturées P permettant d'équilibrer besoins et ressources fourragères à l'échelle du système fourrager** ($X \times P = Y_m (1 - P)$, autrement dit $P = 1/(1 + X/Y_m)$). Il en déduit le **chargement global D = P × S**. Le modèle s'arrête d'effectuer des itérations et retient la configuration annuelle du système (proportion fauche/pâturage) permettant de maximiser D.

A ce moment, la **procédure teste si les ressources fourragères réelles de l'année** (rendement fourrager $Y(1 - P)$ + stocks de fourrages de conservés des années précédentes Stocks (n-1) et Stocks (n-2)) **suffisent ou non à satisfaire les besoins des animaux à l'étable ($X \times P$)**. Si ce n'est pas le cas (**années critiques**), l'éleveur achète des fourrages de manière à combler le manque. Si les fourrages produits sur l'année en cours (Y) suffisent à eux seuls (**bonnes années**), le stock de l'année (n-2) est vendu, le stock de l'année (n-1) conservé et on stocke éventuellement le surplus de

fourrages de l'année en cours. Si les fourrages produits sur l'année en cours ne suffisent pas (**années passables**), l'éleveur utilise en partie ou en totalité les stocks de l'année précédente.

Cette procédure a été utilisée pour simuler l'adaptation au changement climatique du dimensionnement des surfaces en fauche et en pâture dans le **cas d'un système herbager allaitant de moyenne montagne** (Auvergne) reposant sur des **prairies permanentes**. Les résultats préliminaires montrent que les rendements fourragers annuels ont tendance en moyenne à augmenter dans le futur proche (de l'ordre de 1 t MS/ha/an) sous l'effet de l'adaptation des pratiques (augmentation de la fertilisation et du nombre de coupes). Les rendements se maintiennent dans le futur lointain à un niveau de production équivalent à celui du futur proche, sous les effets conjugués de l'adaptation des pratiques (fertilisation équivalente au futur proche mais augmentation du nombre de coupes), de l'augmentation prononcée du CO₂ atmosphérique et de l'aridité du climat à cette période. La durée du pâturage augmente en moyenne dans le futur proche de 20 jours et n'évolue plus dans le futur lointain. Le chargement global D du système augmente très légèrement dans le futur proche (de 0,1 UGB/ha de SFP) et se maintient en moyenne autour de 1,3 UGB/ha SFP dans les futurs proche et lointain (Figure 2b). Cette évolution est permise par l'augmentation de la part de prairies pâturées, qui augmente en moyenne de manière continue de 40 % à 46 % sur l'ensemble de la simulation (Figure 2a), et du maintien de la pression animale instantanée au pâturage. **Dans cet exemple, l'éleveur pourrait maintenir, voire augmenter légèrement, le chargement global de son exploitation, en augmentant la part des surfaces en prairie allouées au pâturage et en intensifiant l'exploitation de ses surfaces en fauche dont la production est susceptible d'augmenter sous l'effet du changement climatique dans un avenir proche.** Dans cet exemple, le nombre des « bonnes années » a tendance à diminuer au profit des « années passables », montrant l'importance des reports de stocks de fourrages conservés. Cette **approche**, bien que simplifiée et ne prenant pas en compte toutes les contraintes qui pèsent sur les systèmes d'élevage, est **innovante et intéressante pour traiter de la question des adaptations des systèmes herbagers et de leurs conséquences environnementales.**

FIGURE 2 – Simulation sous changement climatique de l'allocation des surfaces en herbe et du chargement global de l'exploitation dans le cas d'un système allaitant de moyenne montagne exclusivement herbager.



2.4. Adaptation du calendrier d'alimentation du troupeau

Les résultats des modèles peuvent également **permettre de co-construire des solutions d'adaptation avec les acteurs de la profession**. A partir des niveaux et des calendriers de production simulés par STICS pour la prairie, la luzerne et le maïs (RUGET *et al.*, 2012a), une discussion a été engagée avec les équipes locales d'experts des Réseaux d'élevage (Institut de l'Élevage et Chambre d'Agriculture) (RUGET *et al.*, 2012b). Cette discussion a permis de **dégager des évolutions probables des calendriers d'alimentation de différents lots animaux pour certains systèmes d'élevage** (bovins lait, bovins viande, ovins viande) **caractéristiques** de diverses régions d'élevage françaises.

Ces systèmes d'élevage sont décrits pour les rations et les dates actuelles de début et de fin des diverses périodes d'alimentation, ainsi que pour les besoins en surfaces de cultures fourragères annuelles et de prairies pâturées et/ou fauchées, compte-tenu des rendements associés actuellement connus. Afin d'évaluer les conséquences du changement climatique sur l'équilibre fourrager des systèmes étudiés, des coefficients correcteurs, issus des simulations de STICS et rendant compte de l'évolution future des rendements par rapport à l'actuel, ont été appliqués aux rendements par coupe ou bien aux chargements saisonniers pour la période actuelle. Cette correction a naturellement provoqué un déséquilibre fourrager des systèmes, qu'ont essayé de solutionner les experts mobilisés en proposant de nouveaux systèmes d'alimentation. Dans un **futur proche (2020-2049), peu d'adaptations des systèmes d'alimentation sont envisagées**. *A contrario*, dans le **futur lointain (2070-2099)**, les systèmes pourraient subir, malgré un pâturage plus précoce, un **fort recul du pâturage** et pourraient recourir **davantage aux stocks de fourrages conservés**, surtout en été. Dans les systèmes fourragers où il est présent, **le maïs** pourrait occuper une place croissante dans l'élaboration des stocks, tandis que **la part de surfaces allouées à la fauche est susceptible d'augmenter dans les systèmes herbagers**. Dans certains systèmes la **mise en place d'autres cultures fourragères telles que la luzerne ou le sorgho grain ensilé** pourrait permettre de limiter la baisse attendue du chargement. Dans d'autres systèmes, c'est l'introduction du **pâturage hivernal** qui est envisagée, voire celle des cultures intermédiaires. Ces adaptations du système fourrager sont susceptibles d'affecter les systèmes sur les plans économique (l'UF stockée coûtant plus cher que l'UF pâturée) et social du fait de l'augmentation du travail d'astreinte (distribution) et du travail de saison. D'autres difficultés peuvent apparaître comme l'inadaptation des bâtiments, de la chaîne de récolte, des capacités de stockage des fourrages et des déjections. Ces difficultés suggèrent des **besoins d'accompagnement, de Recherche, et de Développement**. Certaines des adaptations explorées par les scientifiques et les techniciens gagneraient à être validées par des collectifs d'éleveurs, avec des **méthodes plus participatives** (voir PIQUET *et al.*, ce même document), et nécessiteraient une **expertise complémentaire sur les aspects environnementaux** (émissions de GES, stockage du carbone, biodiversité) (voir CAROFF *et al.*, ce même colloque).

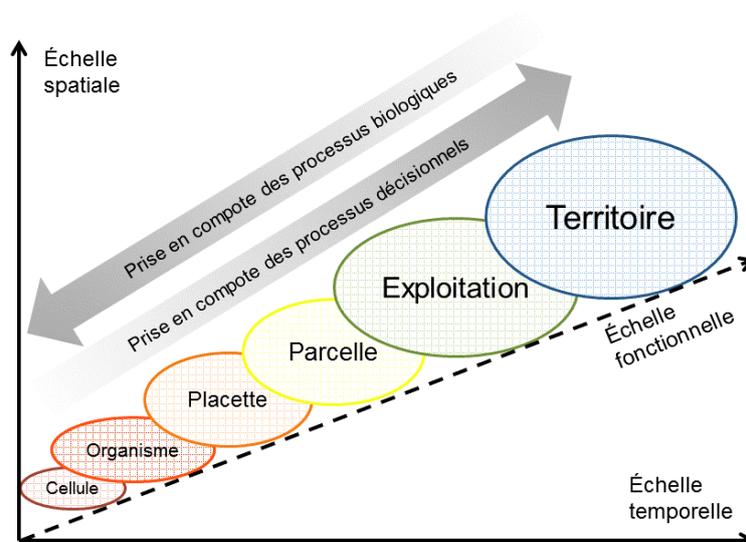
3. Modélisation des adaptations aux échelles du système d'élevage et du territoire

3.1. Intérêts et difficultés

Selon la problématique de recherche, les **niveaux d'organisation** que l'on souhaite représenter au sein d'un modèle peuvent englober la cellule, l'organisme (la plante, l'animal), la placette, la parcelle, l'exploitation voire le territoire. Aux **niveaux de l'organisme** et de la **parcelle**, le fonctionnement du système est principalement déterminé par les **processus biophysiques** impliqués dans les réponses à l'état des ressources et des conditions pédoclimatiques. *A contrario*, le fonctionnement aux **niveaux d'organisation supérieurs** (par exemple celui du système d'élevage) dépend également fortement des **processus décisionnels** impliqués dans la réponse aux facteurs socio-économiques, politiques et culturels qui contraignent les systèmes d'élevage (Figure 3 ; EWERT *et al.*, 2011). Ainsi, **le passage d'un niveau d'organisation à un autre implique généralement un changement d'échelle spatio-temporelle mais aussi institutionnelle** (les sorties des modèles intéressant différents porteurs d'enjeux suivant le niveau d'organisation considéré ; JACKSON *et al.*, 2010). Ce passage requiert également parfois **une reformulation et/ou une extension du modèle** pour prendre en compte les processus les plus importants.

Afin de représenter ces processus biophysiques et décisionnels, et d'étudier les interactions entre les éléments du système, **les modèles de simulation sont le plus souvent systémiques, dynamiques, déterministes et mécanistes**. Ils sont organisés sur la base de sous-modèles et consistent en un ensemble (parfois considérable) de variables d'état, d'équations différentielles et de paramètres. Par conséquent, **la calibration et l'évaluation** de ces modèles **requiert généralement beaucoup de temps et de données expérimentales**, pas toujours accessibles à l'utilisateur, car coûteuses à mesurer sur le long terme. En outre, des **incertitudes** demeurent sur les réponses des cultures et des prairies au changement climatique. Ainsi, le développement de modèles plus parcimonieux et/ou minimisant le nombre de paramètres d'entrée devient une nécessité. Par ailleurs, il apparaît aujourd'hui nécessaire de retourner vers l'expérimentation pour une meilleure calibration

FIGURE 3 – Lien entre niveau d'organisation, échelles et représentation des processus (adapté d'EWERT *et al.*, 2011)



des fonctions de réponse des modèles à la température, au CO₂ et à l'état des ressources minérales et hydriques. Le **développement et le maintien sur le long terme de systèmes expérimentaux ou *in situ*** (ex : SOERE⁶) devient incontournable, si l'on souhaite pouvoir intégrer certains processus tels les phénomènes de résistance, de résilience, de récupération des prairies et des cultures suite aux aléas climatiques, mais aussi pour évaluer les modèles sur le long terme.

De manière générale, les modèles sont **utiles pour formaliser et structurer les connaissances** acquises sur le fonctionnement des agroécosystèmes et des processus décisionnels. Ils sont à même de considérer l'effet de multiples facteurs indépendamment les uns des autres ou en interaction, et d'intégrer les boucles de rétroactions connues. Ils permettent de fait de **dégager le comportement d'ensemble du système** en réponse à ces facteurs. Ainsi, par une démarche « d'expérimentation virtuelle », il est possible de **regarder l'effet d'un facteur seul dans des conditions qui pour le reste sont totalement similaires**, d'**observer** un très grand nombre de **variables de façon dynamique**, d'accéder à des **pas de temps de l'ordre du siècle** ; choses totalement hors de portée de la démarche expérimentale classique. **A l'échelle de la parcelle**, les modèles existants permettent d'ores et déjà d'imaginer comment adapter l'itinéraire technique (fertilisation azotée, irrigation, fauche, pâture) au contexte pédoclimatique. Ils permettent également de comparer l'intérêt de différents génotypes/variétés culturales ainsi que différentes prairies multispécifiques. **A l'échelle du système fourrager**, ils permettent de comparer l'effet de différents dimensionnements des surfaces en fauche et en pâture, ainsi que le calendrier d'alimentation des troupeaux.

Pour raisonner l'adaptation des systèmes d'élevage aux changements climatiques, l'addition des **voies d'adaptation identifiées aux échelles** de la **parcelle** et du **système fourrager peut ne pas se révéler pertinente**. En effet, à ces échelles, on néglige la cohérence d'ensemble du système d'élevage et les possibles effets compensatoires de certaines pratiques, habituellement raisonnés par l'éleveur à l'échelle de l'exploitation. La **construction de modèles à l'échelle de l'exploitation** est donc **nécessaire** mais complexe dans la mesure où elle doit pouvoir rendre compte des adaptations stratégiques et tactiques de l'éleveur en fonction de ses objectifs de production, de ses équipements et moyens de production, et des nombreuses contraintes qui pèsent sur son système (contexte pédoclimatique mais également, dans l'idéal, contexte économique, politique et social). De tels modèles de systèmes d'élevage existent (GOUTTENOIRE *et al.*, 2011). Leur construction peut être facilitée par la mise en place de plates-formes de modélisation (par ex. KEATING *et al.*, 2003 ; JONES *et al.*, 2003).

⁶ Système d'observation et d'expérimentation au long terme pour la recherche en environnement

3.2. Outils et méthodes mobilisables

– Comment changer d'échelle ?

Changer d'échelle requiert de choisir le niveau d'étude approprié en fonction des données réellement disponibles et de la connaissance du système à modéliser. **Plusieurs méthodes de changement d'échelle existent** et ont déjà été utilisées pour passer de l'échelle du système d'élevage à celle du territoire (EWERT *et al.*, 2011). Ces méthodes utilisent des approches descendantes et ascendantes s'appuyant soit sur la **manipulation des données d'entrée ou de sorties des modèles** (agrégation/désagrégation, interpolation, extrapolation, échantillonnage), soit sur une **reformulation des modèles eux-mêmes** (simplification, paramétrage, emboitement).

La **dérivation de modèles analytiques résumés** et de **relations spatiales** est un moyen de réduire la complexité des modèles utilisés dans les problématiques de changement d'échelle. On a par exemple recours à des indicateurs ou à des fonctions de réponse descriptives synthétisant les résultats de sous-modèles explicatifs. L'utilisation de ces modèles résumés n'est pas toujours aisée, d'une part en raison de la connaissance limitée que nous avons des systèmes réels, et d'autre part car ce type de modèle est peu réutilisable, car très fortement lié aux questions auxquelles ils peuvent répondre et pour lesquelles ils ont été conçus. On peut également avoir recours à l'**utilisation de modèles imbriqués/emboîtés**, qui, comme leur nom l'indique, reposent sur un emboitement de modèles existants aux échelles inférieures. C'est actuellement l'**approche la plus utilisée, mais** les modèles résultants sont **gourmands en données d'entrées, en temps** de calcul et en temps pour leur paramétrage. Il faut en outre signaler le problème de l'**accumulation de l'incertitude et des erreurs** dues justement à l'utilisation de plusieurs modèles. De manière générale, l'intégration de ces techniques ne va pas sans poser quelques problèmes parmi lesquels on peut citer une demande croissante de données, une complexité croissante des modèles et des méthodes considérées.

Pour passer de l'exploitation au territoire, deux problèmes majeurs se posent : **prendre en compte la variabilité des conditions pédoclimatiques** mais aussi **la diversité des exploitations d'élevage**, en termes de conduite et de structure, **à l'échelle du territoire**, cette information étant généralement rarement disponible à cette échelle. Pour remédier à ces difficultés, il est possible d'agréger les données descriptives des conditions pédoclimatiques pour définir des zones pédoclimatiques identifiées comme relativement homogènes. De la même manière, on peut également envisager de définir une typologie d'exploitations à simuler avec le modèle en agrégeant les fermes du territoire et/ou d'extrapoler la conduite des exploitations d'une zone à une autre, et de relier le type d'exploitation en présence dans une zone avec les conditions pédoclimatiques qui la caractérisent. Toutes ces méthodes sont peu exigeantes en données d'entrée et en puissance de calcul et sont facilement réutilisables (EWERT *et al.*, 2011). Cependant, elles minimisent souvent les contraintes qui existent au sein d'un territoire et au sein des exploitations.

– Nécessité d'une mutualisation des approches de modélisation

Une plate-forme de modélisation est un outil collectif destiné à une **mise en commun** et une **réutilisation des outils de modélisation** développés par différentes équipes de recherche. L'objectif est de **faciliter la prise en compte des différentes disciplines de Recherche** (agronomie, zootechnie, science du sol, bioclimatologie, physiologie végétale, épidémiologie, économie, statistiques et mathématiques appliquées), impliquées dans les modèles, pour la résolution de questions complexes. Le principe est de permettre un couplage entre tout ou partie des différents modules ou modèles présents dans la plate-forme. De fait, une telle plate-forme **facilite la création d'outils de modélisation aux échelles (fonctionnelles) supérieures** à celle de la parcelle ou du système fourrager telles que le système d'élevage ou le territoire. A terme, ces plates-formes doivent permettre de **gagner en efficacité et en qualité** dans les projets de modélisation futurs.

Pour répondre à ces enjeux, la **plate-forme RECORD**⁷ (CHABRIER *et al.*, 2007 ; BERGEZ *et al.*, 2012) a été créée à l'initiative de l'INRA et est opérationnelle depuis 2010. Différentes fonctionnalités

⁷ Plate-forme de modélisation et de simulation informatique des agroécosystèmes (<http://www4.inra.fr/record>)

facilitent la modélisation aux échelles supérieures. Ce choix autorise, d'une part, le développement de modèles hiérarchiques et couplés se basant sur la théorie des systèmes (approche systémique), et d'autre part, le développement de modèles hétérogènes en termes de formalisme (modèles multi-formalismes). En outre, cette plate-forme offre la possibilité d'implémenter des modèles décisionnels pouvant intervenir dans le pilotage dynamique des systèmes. Cette fonctionnalité s'avère intéressante et a été mise en œuvre avec le modèle STICS. Ainsi, le modélisateur n'est pas obligé de fixer des dates et des niveaux d'intrants *a priori*, il lui suffit de spécifier les règles de décision prévalant au déclenchement des différentes activités de pilotage du système de culture. Ceci est particulièrement intéressant pour réaliser des simulations des adaptations de l'itinéraire technique des systèmes de culture dans un contexte de changement climatique. La plate-forme RECORD est déjà le support d'une **vingtaine de projets de recherche** en cours ou planifiés, s'appuyant sur le développement d'outils de modélisation tels que le modèle Mélodie.

3.3. Une nouvelle génération de modèles plus intégratifs

– Le modèle Mélodie comme support des adaptations à l'échelle du système d'élevage

Les chercheurs de l'INRA en collaboration avec l'institut de l'élevage et l'Ifip-Institut du porc ont créé un **modèle dynamique de simulation du fonctionnement des systèmes d'élevage** : le modèle **Mélodie**⁸ (CHARDON *et al.*, 2012). Ce modèle permet d'évaluer les **flux** (C, N, P, K, Cu et Zn) **présentant un risque pour l'environnement** à l'échelle de l'exploitation agricole, **en fonction du type d'élevage** (bovin et/ou porcin), **du contexte pédoclimatique et de la stratégie de conduite** (gestion des troupeaux, des effluents d'élevage, de l'assolement) **de l'éleveur**. Le système d'élevage y est représenté par **2 sous-systèmes en interaction** : i) le **système biotechnique**, qui **simule les flux de nutriments au sein et entre 4 sous-systèmes**, en s'appuyant sur des modèles préexistants ou bien élaborés pour l'occasion : les sous-ensembles sols-cultures (STICS), stocks d'aliments (système INRA 2007), animaux (GEDEMO) et effluents (module spécifique) ; et ii) le **système décisionnel** qui simule un plan prévisionnel annuel des différentes activités à réaliser (assolement, plan de fumure) et le déclenchement dynamique de ces activités au sein de l'année. La planification annuelle permet, compte-tenu de la stratégie de l'éleveur, de prendre en compte les contraintes et les degrés de liberté liés à l'utilisation du parcellaire et à la gestion des stocks (aliments, effluents). Le pilotage permet une application flexible de ce plan de manière à l'adapter aux conditions particulières de l'année, notamment climatiques. Mélodie permet d'**évaluer ex-ante différentes stratégies innovantes de conduite** des élevages, à même structure d'exploitation (*i.e.* même objectif de production, bâtiments, surfaces) et contexte pédoclimatique, mais aussi d'anticiper la possible évolution des systèmes d'élevage actuels, en prenant en compte la variabilité temporelle et spatiale. Cet exemple montre que **l'insertion d'un module décisionnel** dans un modèle de système d'élevage **permet de simuler des systèmes** (assolement, plan d'épandage, plan d'alimentation) **plus sensibles** au contexte pédoclimatique que beaucoup de modèles dont le pilotage est une donnée d'entrée ; avec des résultats plus variables en termes de production, d'achats d'intrants et de conséquences pour l'environnement. En perspective, il est envisagé d'étendre Mélodie afin de pouvoir fournir une **évaluation économique des stratégies** de conduite simulées, et de servir d'appui à une **évaluation multicritère** des systèmes de production.

– Le modèle CASIMOD'N comme support des adaptations à l'échelle du bassin versant

Le couplage entre un modèle hydrologique (TNT2) et Mélodie, a permis d'étudier l'impact de changement de pratiques sur les pertes en nitrates à l'échelle d'un bassin versant. Il s'agit du **bassin versant du Yar** (situé en Bretagne), pour lequel de nombreuses informations étaient disponibles sur les parcelles, les exploitations et l'hydrologie (MOREAU, 2012). L'objectif de ce travail était *in fine* de **définir des scénarios permettant de réduire les pertes de nitrates à l'exutoire**. Les assolements

⁸ Modélisation des élevages en langage objet pour la détermination des impacts environnementaux

prédits par Mélodie montrent une bonne adéquation (à la fois dans le temps et dans l'espace) avec les observations réalisées sur ce bassin versant. De même, la simulation des quantités d'azote épandues par exploitation est globalement en accord avec les données obtenues par enquête dans les exploitations. Cette évaluation du modèle de décision de Mélodie à l'échelle d'une cinquantaine d'exploitations montre la **capacité de ce type de modèles à simuler des stratégies d'acteurs au sein d'un territoire**. Elle témoigne également de leur utilité pour étudier l'incidence de changement de pratiques au sein d'un territoire, en prenant en compte les contraintes spécifiques à chaque exploitation et à chaque système de production. Ce type d'approche est particulièrement innovant et doit permettre d'adapter les questions de recherche aux particularités de chaque territoire, et ainsi d'aider les différents acteurs dans la prise de décisions.

Conclusion

Les approches de modélisation actuellement utilisées aux échelles de la parcelle et du système fourrager présentent d'ores et déjà un réel intérêt pour aborder la question des adaptations au changement climatique et leurs conséquences environnementales. Elles s'accompagnent cependant encore d'incertitudes importantes liées, d'une part, à l'état de nos connaissances sur les réponses des prairies et des grandes cultures au changement climatique et aux événements extrêmes et, d'autre part, à la structure même des modèles. Des expérimentations sont actuellement menées qui devraient permettre de mieux comprendre et de mieux représenter ces réponses. En outre, la modélisation doit davantage associer les bénéficiaires de la Recherche afin de progresser dans le transfert des connaissances et savoir-faire à même de réussir l'adaptation des systèmes au changement climatique. Une piste envisageable serait de favoriser une démarche de co-construction basée sur des échanges entre acteurs de la recherche et porteurs d'enjeux afin de construire des scénarios et d'en évaluer la pertinence (MCCRUM *et al.*, 2009 ; DURU *et al.*, 2012). En ce sens, le co-développement d'indicateurs, par exemple agrométéorologiques, nous semble intéressant pour compléter l'information délivrée par les modèles. Le caractère pluridisciplinaire des questions posées montre la nécessité de poursuivre le développement de modèles à l'échelle opérationnelle de l'exploitation et requiert le développement de plates-formes de modélisation permettant une intégration des différentes disciplines de Recherche impliquées dans la construction de ces modèles. Il apparaît également nécessaire de développer des modèles permettant une évaluation multicritère (environnementale économique et sociale) des adaptations proposées à l'échelle de l'exploitation voire des territoires. Cela nécessitera d'impliquer l'ensemble des acteurs des filières lait/viande.

Références bibliographiques

- ANDRIEU N., JOSIEN E., DURU M. (2004) : "Diversité du territoire d'exploitation et sensibilité aux aléas climatiques : exemples d'élevages laitiers en Auvergne", *Fourrages*, 180, 483-494.
- BERGEZ J.-E., CHABRIER P. *et al.* (2012) : "An open platform to build, evaluate and simulate integrated models of farming and agroecosystems", *Environmental Modelling & Software* (In Press).
- BRISSEON N., LEVRAULT F. (2010) : *Climate change, agriculture and forests in France. Simulations of the impacts on the main species. The Green Book of the CLIMATOR Project (2007–2010)*, ADEME, Angers.
- BRISSEON B., GARY C. *et al.* (2003) : "An overview of the crop model STICS", *Europ. J. Agronomy*, 18, 309-332.
- CHABRIER P., GARCIA F., MARTIN-CLOUAIRE R., QUESNEL G., RAYNAL H. (2007) : "Toward a simulation modeling platform for studying cropping systems management: the Record project", *International Congress on Modelling and Simulation, International Society for Computer Simulation*, 10-13.
- CHARDON X., RIGOLOT C. *et al.* (2012) : "MELODIE : a whole-farm model to study the dynamics of nutrients in dairy and pig farms with crops", *Animal*, 1-11.
- CIAIS P., REICHSTEIN M. *et al.* (2005) : "Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003", *Nature*, 437, 529-533.
- CRUZ P., THEAU J.-P., LECLoux E., JOUANY C., DURU M. (2010) : "Typologie fonctionnelle de graminées fourragères pérennes : une classification multitraits", *Fourrages*, 201, 11-17.
- DEDIEU B., LOUAULT F., TOURNADRE H., BENOIT M. (2008) : "Réponse des systèmes d'élevage innovants à la variabilité climatique : une expérimentation en production extensive ovin viande intégrant des préoccupations environnementales", *L'élevage en mouvement: Flexibilité et adaptation des exploitations d'herbivores*, Dedieu B., Chia E., Leclerc B., Moulin C.-H., Tichit M. (ed.), éd. Quae, Versailles, 161-178.

- DOBREMEZ L., JOSIEN E., CAMACHO O. ANDRIEU N. (2008) : “La sécurisation des systèmes fourragers et la réponse aux enjeux agri-environnementaux en montagne”, *L'élevage en mouvement: Flexibilité et adaptation des exploitations d'herbivores*, Dedieu B., Chia E., Leclerc B., Moulin C.-H., Tichit M. (éd.), éd. Quae, Versailles, 241-258.
- DURU M., FELTEN B., THEAU J. P., MARTIN G. (2012) : “A modelling and participatory approach for enhancing learning about adaptation of grassland-based livestock systems to climate change”, *Reg. Environ. Change*, 12, 739–750.
- EWERT F., VAN ITTERSUM M.K. *et al.* (2011) : “Scales changes and model linking methods for integrated assessment of agri-environmental systems”, *Agric. Ecosyst. Environ.*, 142, 6-17.
- GOMAS A.L. (2008) : “Alternatives au maïs ensilage : freins et perspectives dans les élevages bovins laitiers du sud des Deux-Sèvres”, *Fourrages*, 196, 490-494.
- GOUTTENNOIRE L., COURNUT S., INGRAND S. (2011) : “Modelling as a tool to redesign livestock farming systems: a literature review”, *Animal*, 5, 1957-1971.
- GRAUX A.-I., GAURUT M. *et al.* (2011) : “Development of the Pasture Simulation Model for assessing livestock production under climate change”, *Agric. Ecosyst. Environ.*, 144, 69–91.
- GRAUX A.-I., BELLOCCHI G., LARDY R., SOUSSANA J.-F. (2013a) : “Ensemble modelling of climate change risks and opportunities for managed grasslands in France”, *Agric. Forest Meteorol.*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.06.010>.
- GRAUX A.-I., LARDY R., GAURUT M., SOUSSANA J.-F., HILL D. (2013b) : “Modelling adaptations of French grassland-based beef-cattle breeding systems to climate change”, en préparation pour *Agricultural Systems*.
- HERVIEU B. (2002) : “La multifonctionnalité : un cadre conceptuel pour une nouvelle organisation de la recherche sur les herbages et les systèmes d'élevage”, *Fourrages*, 171, 219-226.
- JACKSON L., VAN NOORDWIJK M. *et al.* (2010) : “Biodiversity and agricultural sustainability: from assessment to adaptive management”, *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2, 80–87.
- JONES J., HOOGENBOOM G. *et al.* (2003) : "The DSSAT cropping system model", *Eur. J. Agron.*, 18, 235-265.
- KEATING B.A., CARBERRY P.S. *et al.* (2003) : "An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation", *Eur. J. Agron.*, 18, 267-288.
- LEMAIRE G., SALETTE J. (1984) : “Relation entre dynamique de croissance et dynamique de prélèvement d'azote pour un peuplement de graminées fourragères. I Etude de l'effet du milieu”, *Agronomie*, 4, 423-440.
- MCCRUM G., BLACKSTOCK K. *et al.* (2009) : “Adapting to Climate Change in Land Management: the Role of Deliberative Workshops in Enhancing Social Learning”, *Environmental Policy and Governance*, 426, 413–426.
- MOREAU P. (2012) : *Modélisation intégrée des systèmes agricoles et de la dynamique de l'azote dans le bassin versant : de la conception du modèle au test de scénarios*, Thèse de l'Institut supérieur des sciences agronomiques, agro-alimentaires, horticoles et du paysage, Agrocampus Ouest – UEB, 273 pp.
- MOREAU J.-C., RUGET F. *et al.* (2008) : “Prospective autour du changement climatique : adaptation de systèmes fourragers”, *Actes des 15^e Rencontres Recherche Ruminants*, 193-200.
- MOSNIER C., MOREAU J.-C., BOUTRY A., LHERM M., DEVUN J. (2012) : “Sensibilité des élevages allaitants aux aléas climatiques selon la place des prairies dans les systèmes fourragers”, *Actes Journées de l'AFPF*, 73-82.
- RIEDO M., GRUB A., ROSSET M., FUHRER J. (1998) : “A pasture simulation model for dry matter production and fluxes of carbon, nitrogen, water and energy”, *Ecol. Model.*, 105, 41-183.
- RUGET F., CLASTRE P. *et al.* (2012a) : “Conséquences possibles des changements climatiques sur la production fourragère en France. I. Estimation par modélisation et analyse critique”, *Fourrages*, 210, 87-98.
- RUGET F., CLASTRE P. *et al.* (2012b) : “Conséquences possibles des changements climatiques sur la production fourragère en France. II. Exemples de quelques systèmes d'élevage”, *Fourrages*, 211, 243-251.
- SOUBEYROUX J.-M., VIDAL J.-P. *et al.* (2011) : *Impact du changement climatique en France sur la sécheresse et l'eau du sol*, Rapport final du projet CLIMSEC.
- SOUSSANA J.-F., GRAUX A.-I., TUBIELLO F.N. (2010) : “Improving the use of modelling for projections of climate change impacts on crops and pastures”, *J. Exp. Bot.*, 61, 2217-2228.
- THORNLEY J.H.M. (1998) : “Grassland dynamics: an ecosystem simulation model”, *CAB International, Wallingford, United Kingdom*, 241 pp.