

Des modèles pour comprendre la réponse des écosystèmes prairiaux au changement climatique

Raphaël Martin, Michael Gaurut, Romain Lardy, Anne-Isabelle Graux, Jean-Louis Drouet, Jean-Louis Fiorelli, Vincent Blanfort, Mathieu Capitaine, Sylvia Duretz, Benoit Gabrielle, et al.

▶ **To cite this version:**

Raphaël Martin, Michael Gaurut, Romain Lardy, Anne-Isabelle Graux, Jean-Louis Drouet, et al.. Des modèles pour comprendre la réponse des écosystèmes prairiaux au changement climatique. Innovations Agronomiques, 2011, 12, pp.97-108. hal-01019727

HAL Id: hal-01019727
https://hal.science/hal-01019727

Submitted on 28 May 2020

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Innovations Agronomiques 12 (2011), 97-108

Des modèles pour comprendre la réponse des écosystèmes prairiaux au changement climatique

Martin R.[1], Gaurut M.[1], Lardy R.[1], Carrère P.[1], Graux A.-I.[1], Drouet J.L.[2], Fiorelli J.L.[3], Blanfort V.[4], Capitaine M.[5], Duretz S.[2], Gabrielle B.[2], Cellier P.[2], Soussana J.-F.[1]

[1] : INRA, UR 0874 UREP Unité de Recherche sur l'Ecosystème Prairial, F-63100 Clermont-Ferrand, France

[2] : INRA-AgroParisTech, UMR 1091 EGC Environnement et Grandes Cultures, F-78850 Thiverval-Grignon, France

[3] : INRA, UR 0055 ASTER Agro-Systèmes Territoires Ressources, F-88500 Mirecourt, France

[4] : CIRAD, UMR 112 SELMET, F-97387 Kourou, France

[5] : VetAgroSup, AFOS Agronomie et Fertilité Organique des Sols, F-63370 Lempdes, France

Correspondance : raphael.martin@clermont.inra.fr

Résumé :

Une des attentes forte de la société et des décideurs politiques est de mieux comprendre et de pouvoir anticiper les réponses des agro-écosystèmes aux changements climatiques et atmosphériques anticipés. La prévision sur le long-terme de ces impacts sur la contribution des agro-écosystèmes à l'effet de serre et sur leur potentiel d'atténuation des émissions permis par le stockage de carbone dans la matière organique des sols repose nécessairement sur l'utilisation de modèles. PaSiM est un modèle biogéochimique déterministe à dominante mécaniste se situant à l'échelle de la parcelle de prairie et qui a pour objectif principal de modéliser une prairie spatialement homogène et ses principaux flux de carbone, d'azote et d'eau. Au-delà de cette modélisation « prairie centrée », le modèle FarmSim permet de simuler le comportement de systèmes d'élevage herbagers ou basés sur le maïs à l'échelle de la ferme. Résultant du couplage des modèles PaSiM, CERES (culture) et GESTIM (intrans, calcul des flux à l'étable) il fournit un bilan annuel des émissions de GES à l'échelle de l'exploitation. Ce papier se propose de décrire ces deux modèles et l'intérêt qu'ils présentent pour répondre aux attentes sociales vis-à-vis des impacts du changement climatique sur les prairies et les systèmes d'élevage.

Mots-clés : Modèle, Ecosystème prairial, Gaz à Effet de Serre, bilan carbone/azote

Abstract: Models to understand the response of grassland ecosystems to climate change

One of the expectations of society and stakeholders is to better understand and anticipate agro-ecosystems responses to atmospheric and climatic changes. Modelling is required to predict long-term climate change impacts on the greenhouse gas (GHG) balance of these ecosystems and their GHG mitigation potential through soil C sequestration. PaSiM is a grassland biogeochemical deterministic and mechanistic model, that assumes homogeneous vegetation and that simulates at plot scale grassland main carbon, nitrogen and water fluxes. At a larger scale, FarmSim couples the models PASIM, CERES (crop) and GESTIM (inputs, fluxes at barn) to make an assessment of GHG balance at the farm level. This paper aims at describing these two models to show in what extent they are useful tools in climate change impact studies on grassland and pasture-based livestock systems.

Keywords: Model, Grassland ecosystem, Greenhouse Gases, Carbon/Nitrogen balance

Introduction

A l'échelle mondiale, le secteur de l'élevage assure une part importante de l'alimentation de la planète, tant en volume qu'en qualité (apport protéique). Les pâturages et les terres cultivées pour la production de fourrages représentent plus de 25% des terres émergées (libres de glace). A l'échelle nationale, les prairies constituent une formation végétale majeure avec près de 25% de la superficie du territoire, contre un peu plus de 15 % pour l'Europe des 27. Elles correspondent, le plus souvent, à des formations végétales secondaires maintenues au stade herbacé par le pâturage et/ou la fauche. L'existence même des prairies dépend donc d'activités d'élevage qui concernent, au plan national, 60% des exploitations agricoles.

Autrefois limitées à la fourniture de biens alimentaires, les attentes de la société vis-à-vis des prairies se sont étendues ces deux dernières décennies aux multiples services ou fonctions (multifonctionnalité) assurées par ces écosystèmes au plan agricole et environnemental. Cette modification des attentes de la société a conduit à réfléchir à la multifonctionnalité des prairies dans les systèmes de production et dans les territoires, animant un débat qui a été révélateur de la diversité des richesses produites par les activités d'élevage. Aux richesses alimentaires (production de lait ou de viande) se sont ajoutées des richesses non alimentaires (énergie) ou des biens immatériels (biodiversité, fertilité du sol), et enfin, la reconnaissance par la société que la gestion des biens privés (exploitations) conduisait à l'entretien de biens et patrimoines publics (paysage). Parallèlement, des rapports internationaux pointaient du doigt la contribution des activités d'élevage aux émissions de gaz à effet de serre (GES : CO_2, CH_4, N_2O) et au changement climatique. Des travaux récents ont toutefois démontré la capacité de ces systèmes à réduire leur contribution aux émissions de GES, notamment grâce à leur capacité à séquestrer le carbone dans le sol, en particulier dans le cas de prairies permanentes (Soussana et al*,* 2007, 2010]. Cette capacité sera toutefois dépendante des évènements climatiques extrêmes anticipés pour l'avenir, et qui, à l'image des années 2003 et 2005, pourraient entraîner un relargage de carbone vers l'atmosphère non négligeable, de l'ordre de plusieurs années de stockage. De plus, ces évènements sont susceptibles de réduire considérablement la production fourragère [Ciais et al, 2005] et les stocks de foin et d'ensilage constitués pour l'hiver. De tels événements climatiques, considérés aujourd'hui comme exceptionnels, pourraient à la fin du siècle se reproduire une année sur deux ou trois [GIEC, 2007]. L'enjeu aujourd'hui est de fournir les moyens à ces systèmes de s'adapter au changement climatique et/ou de contribuer à l'atténuation de ces effets.

Relever ce défi implique un accroissement des connaissances scientifiques à l'échelle de l'écosystème, particulièrement sur les mécanismes pilotant son fonctionnement et sur les processus de régulation interne. Compte tenu du grand nombre de facteurs (abiotiques ou biotiques) susceptibles d'influer sur le système et les interactions existantes entre eux, la seule approche expérimentale est insuffisante. C'est en partie pour cela que depuis une vingtaine d'années, de nombreuses études ont tenté de modéliser numériquement les impacts du changement climatique sur la production agricole [Gitay et al, 2001]. Les modèles permettent de simuler les situations qui peuvent potentiellement résulter d'une modification du climat futur. Cependant, de la même façon que la carte n'est pas le territoire, un modèle n'est pas la réalité. Il en est une abstraction, qui caractérise les processus principaux et leurs paramètres associés. Un modèle est donc conçu pour un système donné, afin de répondre à une question précise. Il représente une formalisation des connaissances acquises sur le fonctionnement du système étudié dans un langage mathématique et algorithmique. Ce type d'outil permet de confronter ses sorties (résultats) aux données observés ou mesurés dans des situations réelles, et d'en tirer des questionnements sur notre capacité à comprendre ou à prédire le système étudié.

L'objet de cet article est de montrer en quoi cette démarche de modélisation a permis de construire des outils de recherches à même de nous faire progresser dans notre compréhension du fonctionnement de l'écosystème prairial et des systèmes d'élevage. Mis au service d'une problématique spécifique, telle que l'impact du changement climatique sur les services rendus par les prairies, ou l'évaluation des

capacités de compensation, voire d'adaptation de ces écosystèmes à des évènements climatiques aléatoires, ces modèles sont à même de nous orienter sur des évolutions probables. Ce type d'outils ne constitue cependant pas en l'état des outils d'aide à la décision. Ce document présente deux de ces outils :

- PaSiM, un modèle de simulation des prairies, qui permet notamment d'étudier, à l'échelle d'une parcelle, l'impact du changement climatique sur les prairies fauchées et pâturées;
- FarmSim, modèle qui permet d'étendre la simulation de la parcelle à l'échelle d'une exploitation agricole.

Simuler le fonctionnement prairial à l'échelle parcellaire.

PaSiM [Riedo *et al.* 1998, Vuichard *et al.* 2007, Graux *et al.* 2010] est un **modèle** qui simule le fonctionnement d'un écosystème prairial (sol, végétation, herbivores) en réponse aux conditions pédoclimatiques et de gestion à un pas de temps fin, de l'ordre de la demi-heure. Il permet de réaliser des simulations sur des échelles de temps longues (plusieurs dizaines d'années), et d'intégrer notamment dans ses prédictions l'effet de la variabilité climatique.

Ce modèle simule notamment :

- le rendement des prairies,
- les productions animales (troupeaux allaitant et laitier),
- les bilans hydrique et azoté,
- les émissions des principaux GES (CO_2, N_2O, CH_4),
- le stockage de carbone.

Il permet éventuellement d'optimiser la gestion (fauche, pâturage, fertilisation) dans un objectif de maximisation de la production (rendement, chargement animal).

PaSiM doit être renseigné pour :

- Le **climat,** qui prend en compte les facteurs physico-chimiques de l'environnement (température, pluies, humidité, rayonnement) et la composition en gaz de l'atmosphère (CO_2).
- Le **sol,** décrit par horizon, pour sa profondeur, sa texture, sa densité et son profil hydrique et de température.
- La **végétation**, caractérisée selon le type de prairie (permanente ou temporaire) et paramétrée pour refléter les caractéristiques de la parcelle simulée (proportion de légumineuses, hauteur du couvert, etc.)
- Les **herbivores** (vaches allaitantes et leurs veaux, vaches laitières, génisses ou moutons), caractérisés notamment pour leur état, leur poids et leur âge à la mise à l'herbe et leur potentiel de lactation dans le cas des vaches laitières.
- La **gestion** de la parcelle, incluant la définition des périodes de pâturage (date, durée et chargement), des fauches (date), et de la fertilisation minérale et/ou organique (dates, nature et quantité).

Les sorties de la simulation permettent notamment d'analyser les réponses en termes, par exemple, de rendement et de qualité de la production (teneur en protéines) d'une prairie aux conditions pédoclimatiques et à la gestion exercée.

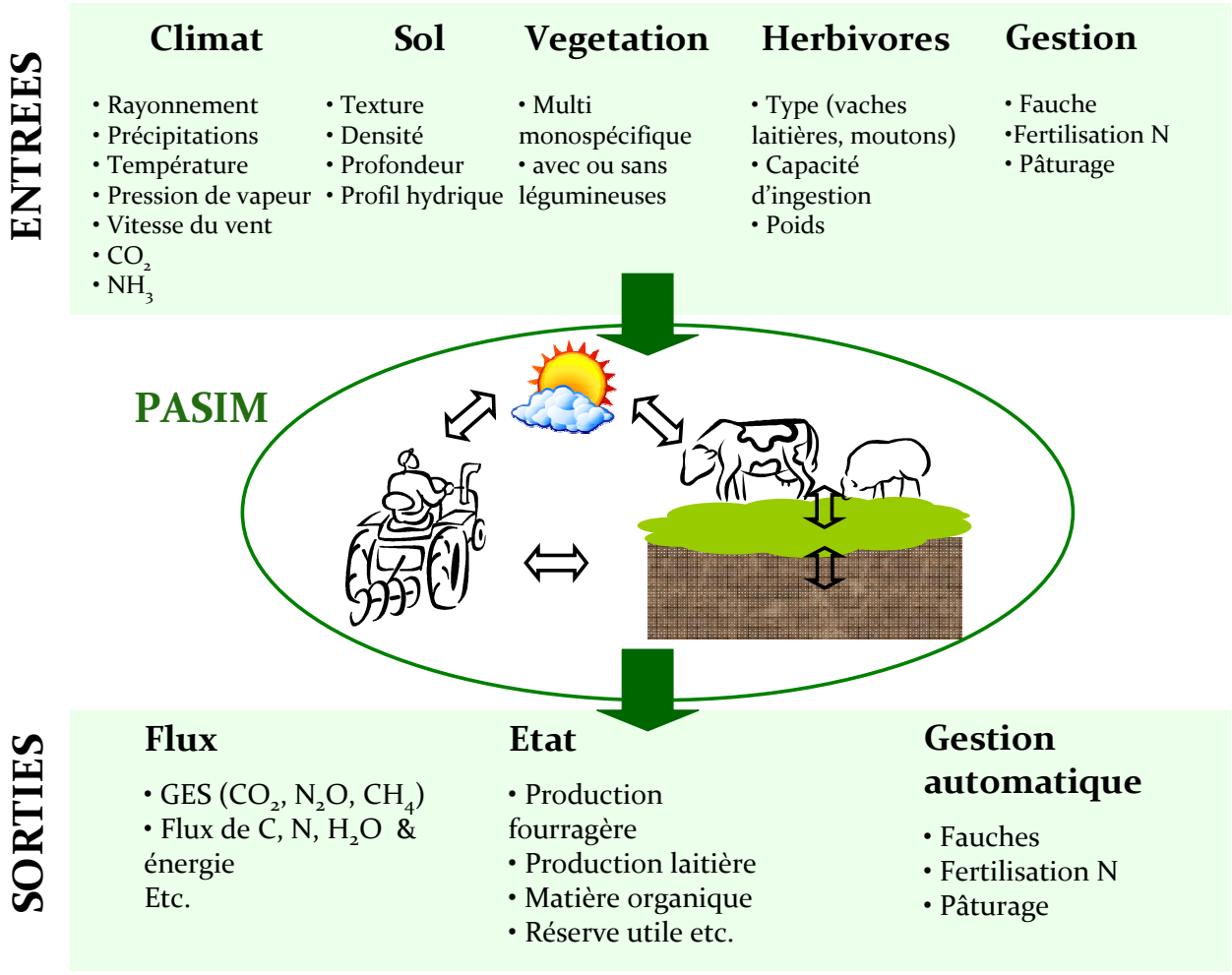


Figure 1 : Présentation de la structure du modèle PaSiM. En haut de la figure sont présentées les variables d'entrées, qui permettent de définir les conditions de la simulation (climat, sol, végétation, herbivores, gestion prescrite) ; en bas figurent les sorties agro-environnementales du modèle et éventuellement les itinéraires techniques mis en jeux au cours de la simulation (dans le cas d'une optimisation des pratiques).

Le modèle PaSiM est dit « mécaniste » car il est construit sur la description des mécanismes pilotant le fonctionnement du système. Le couvert végétal est représenté, à l'échelle de la communauté végétale, sous la forme d'une « plante moyenne », sans considération de l'hétérogénéité existante au sein de la parcelle. Le modèle est déterministe, c'est-à-dire que pour un même jeu de paramètres en entrée, deux simulations consécutives produiront les mêmes sorties.

Dans le cadre du projet CLIMATOR (ANR 2007-2010 Vulnérabilité : Milieux et Climat, http://w3.avignon.inra.fr/projet_climator/), PaSiM a été utilisé pour simuler les impacts du changement climatique sur les services agro-environnementaux assurés par les prairies (rendement, production de lait, stockage de carbone, restitution d'eau aux nappes souterraines) et les rétroactions associées sur le climat, *via* les émissions de GES par les prairies.

Les impacts ont été étudiés à moyen (2020-2049) et long terme (2070-2099) pour différents scénarios climatiques futurs, plus ou moins optimistes en termes de réchauffement, et en douze sites, considérés comme représentatifs de la gamme de climats existant à l'échelle du territoire et choisis pour la disponibilité des données météorologiques mesurées depuis 1970. A titre d'exemple, les Figures 2 et 3 montrent, respectivement, l'évolution probable de la production fourragère et du stockage de carbone,

dans le cas d'une prairie permanente gérée de manière intensive (fauchée au printemps, et pâturée deux quinzaines en été et automne à 1.5 UGB.ha^{-1}, fertilisée à hauteur de 200 kg N.ha^{-1}.an^{-1}) pour un scénario climatique A1B « intermédiaire » (réchauffement d'environ 3°C à la fin du siècle).

Ces variables sont en effet clés, puisque compte tenu des attentes environnementales de la société envers les systèmes d'élevages, la question n'est pas seulement d'être capable de produire autant, voire plus qu'avant, mais de le faire en minimisant la contribution des prairies à l'effet de serre (vers un bilan GES ≤ 0).

Dans cet exemple, le modèle prédit une augmentation générale du rendement annuel des prairies. La variabilité interannuelle associée à ces rendements demeure assez faible pour les sites de l'ouest et augmente avec un gradient de continentalité associé à un accroissement des risques de sécheresse estivale. Cela est particulièrement net pour les sites de Toulouse et Avignon.

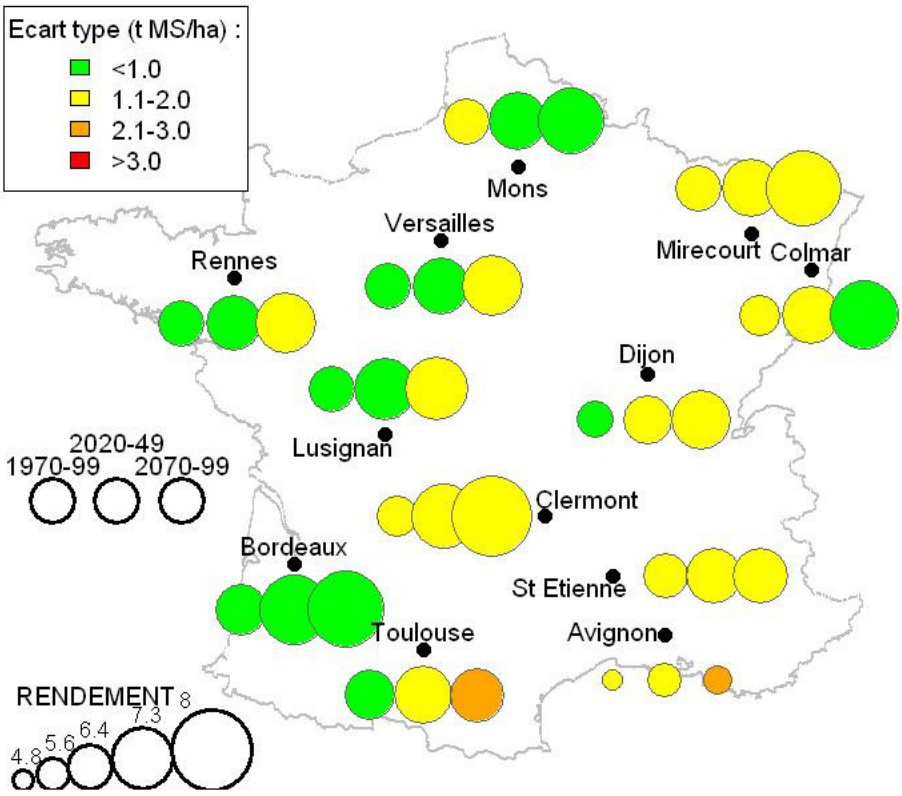


Figure 2 : Evolution du rendement annuel (t MS/ha) pour une prairie permanente intensive implantée sur un sol prairial superficiel, pour les périodes "passé proche" (1970-1999), "futur proche" (2020-2049), "futur lointain" (2070-2099) et pour le scénario climatique A1B,

Il est beaucoup plus difficile de déduire une tendance nette à l'échelle du territoire quant au stockage du carbone dans le sol (Figure 3). On peut remarquer une très forte variabilité interannuelle sur la plupart des sites.

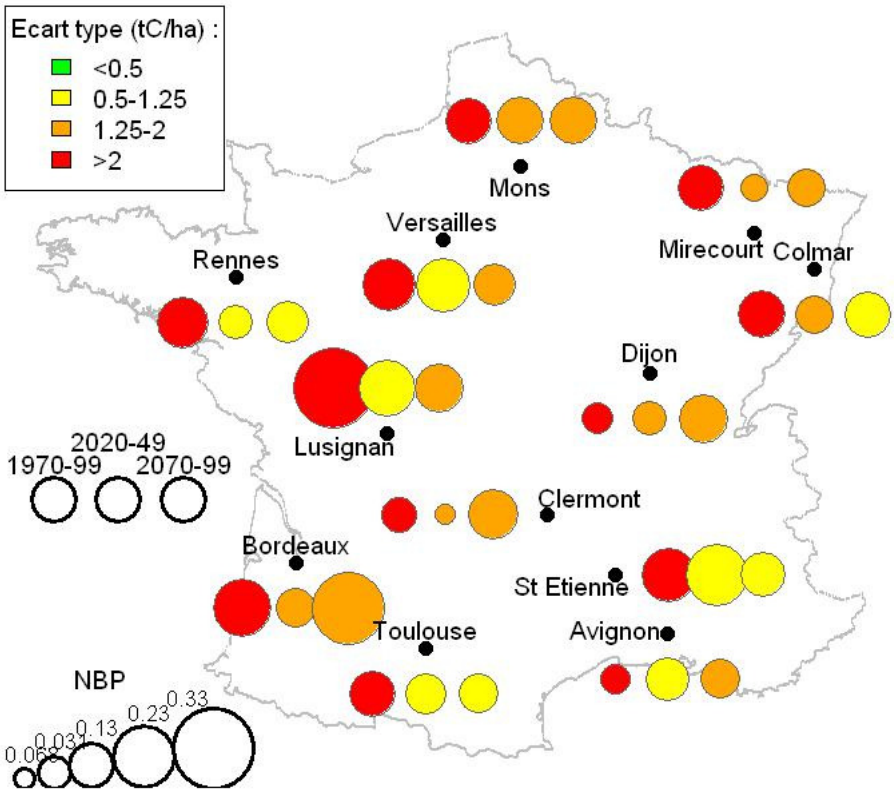


Figure 3 : Evolution du stockage de carbone (Net Biome Productivity, t C/ha/an) pour une prairie permanente intensive implantée sur un sol prairial superficiel, pour les périodes "passé proche" (1970-1999), "futur proche" (2020-2049), "futur lointain" (2070-2099) pour le scénario climatique A1B. Une valeur positive indique une activité de stockage de carbone par les prairies.

Au-delà des émissions associées aux surfaces en prairies, les émissions à l'échelle du système d'élevage peuvent être estimées en évaluant les émissions « à l'étable » pour la période durant laquelle les animaux sont supposés exclusivement nourris à partir des stocks de fourrages conservés issus des fauches effectuées. On peut alors faire un bilan net de GES à l'échelle du système, exprimé en équivalent CO_2 *via* un coefficient tenant compte de la durée de vie et du pouvoir de réchauffement des trois GES étudiés (CO_2, N_2O, CH_4). On observe (Figure 4) alors que les prairies permanentes, gérées de façon extensive (fauchées au printemps, en été et en automne, non fertilisées, 20% de légumineuses), présentent le bilan de GES le plus favorable d'un point de vue environnemental, aussi bien à moyen qu'à long terme.

Les simulations effectuées sont entachées d'incertitudes liées à la construction des scénarios climatiques. Aux incertitudes associées aux projections climatiques s'ajoutent des questions sur le domaine de validité des modèles d'impact tels que PaSiM. La plupart des modèles actuels d'agro-écosystèmes n'a pas été évaluée dans des conditions extrêmes de températures, qui sont susceptibles de modifier la physiologie et la phénologie des végétaux, le fonctionnement du sol et la dynamique des communautés [Tubiello et al, 2007]. En particulier, des interactions de grande ampleur entre la dynamique de la diversité biologique et le changement climatique sont prévisibles. Cette prise en compte est en cours dans le cadre du projet ANR-VALIDATE. Deux modèles d'écosystèmes prairiaux (dont PaSiM) seront évalués, en incluant notamment la dynamique de la végétation. Cela permettra d'inclure les effets de cette dynamique sur le fonctionnement de la prairie et de notamment prendre en compte la mortalité des espèces végétales suite à une exposition à des événements extrêmes (sécheresse et canicule).

Le modèle PaSiM est engagé sur d'autres projets, notamment le projet européen CarboExtreme, qui s'intéresse aux impacts des évènements extrêmes sur les prairies, mais également le projet européen ANIMALCHANGE qui cherche en particulier à fournir des solutions d'adaptation et d'atténuation de la contribution des prairies et des systèmes d'élevage au changement climatique ou encore le projet EPAD qui étudie la potentielle application de PaSiM aux prairies tropicales. Sa généricité permettra donc à terme d'établir des références comparables dans une large gamme de situations. Ainsi, il sera à même de fournir des références pour raisonner les impacts du changement climatique sur les prairies, ainsi que d'évaluer leur contribution au bilan de GES. Cependant, ce modèle reste un modèle à l'échelle de la parcelle et il ne permet donc pas de prendre en compte l'entièreté des impacts et des adaptations possibles à l'échelle d'un système d'élevage. C'est pour pallier ce manque qu'un second modèle, « FarmSim », a été développé.

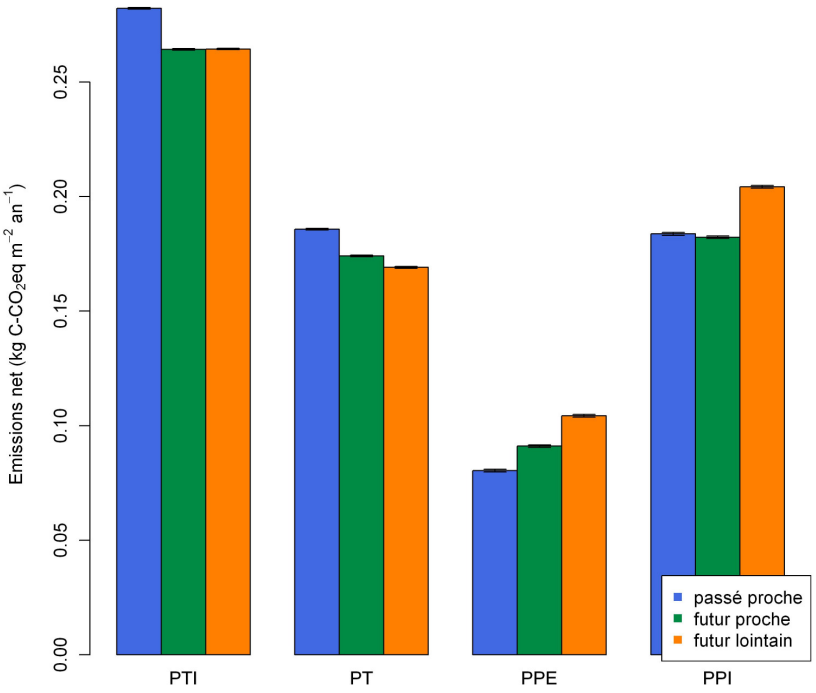


Figure 4 : Emission net de gaz à effet de serre à Avignon pour le scenario A2 (réchauffement de 4°C à la fin du siècle) pour une prairie implantée sur un sol superficiel, pour les périodes "passé proche" (1970-1999), "futur proche" (2020-2049), "futur lointain" (2070-2099) et pour différentes gestions : PTI (Prairie temporaire de ray-grass Irriguée), PT (Prairie temporaire de ray-grass pluviale), PPE (Prairie Permanente Extensive), PPI (Prairie Permanente Intensive)

Simuler le fonctionnement du système d'élevage.

Le modèle d'exploitation FarmSim est issu d'une démarche visant à standardiser les calculs d'émissions de GES des exploitations agricoles européennes. Il a été initialement développé en Visual Basic [Salètes et al, 2004] dans le cadre du projet GREENGRASS (2002-2004). FARMSIM modélise une exploitation d'élevage dans son intégralité. Il a été conçu pour permettre i) de décrire de manière cohérente et standardisée les flux de carbone et d'azote pour les exploitations agricoles d'élevage; ii) de structurer la collecte de l'ensemble des données nécessaires au calcul du bilan des GES à l'échelle de l'exploitation agricole ; iii) de préparer les fichiers d'entrée des modèles utilisés pour calculer le bilan de GES des composantes de l'exploitation agricole. FarmSim a été traduit en Java [Duretz, 2007] afin d'assurer sa portabilité entre les diverses plateformes (Windows, Linux, Mac, …)).

La structure générale de FarmSim (Figure 5) fait apparaître les trois modules supports du modèle qui considèrent le bilan GES émis par les bâtiments d'élevage (HOUSING-IPCC), les grandes cultures (CERES-EGC) et la prairie (PaSim).

Le modèle HOUSING est dit « statique » car il utilise simplement des facteurs d'émissions proposés par la méthodologie IPCC [IPCC, 1997] permettant ainsi de calculer les émissions de CH_4 et N_2O issues du traitement et du stockage des déjections animales, de la fermentation entérique chez les animaux en stabulation et des cultures. Le principal défaut de ces coefficients est leur grande marge d'incertitude car ils ne prennent pas en compte l'effet de paramètres comme la météo par exemple.

La partie culture du système d'élevage est gérée par le modèle CERES-EGC [Gabrielle et al, 2006]. Ce modèle, codé en FORTRAN, est basé sur un outil d'aide à la décision auquel se sont greffés des modules de bilans de GES [Rolland et al, 2007]. CERES-EGC est un modèle mécaniste qui implémente des processus clefs des cultures (croissance des plantes, flux de carbone et d'azote, nitrate, …). Ce couplage a permis de remplacer les calculs qui étaient jusqu'alors réalisés via la méthodologie IPCC (bilan des GES des cultures) par des simulations tenant compte des données météorologiques.

La composante prairiale est modélisée de façon dynamique par le modèle PASIM (cf partie précédente).

Dans sa conception, FarmSim identifie les processus majeurs implémentés au sein de chacun des modules. Les paramètres d'entrées concernent les conditions climatiques et édaphiques (sol), les itinéraires techniques (gestion culture et prairie) et la conduite du troupeau tant au niveau de la mobilisation des chargements que du calcul des rations ou la gestion des déjections. En sortie, il est possible d'obtenir les flux des principaux GES produits dans les trois modules, permettant ainsi un bilan complet à l'échelle du système. FarmSim réalise le bilan en agrégeant l'ensemble de données issues des modules, chaque parcelle de prairie ou de culture étant considérée comme une entité à part. On parle alors de modèle de type agrégatif. Cette structure de modélisation permet de mettre en évidence le fait que le bilan de GES des prairies et des cultures est directement influencé par les données météorologiques.

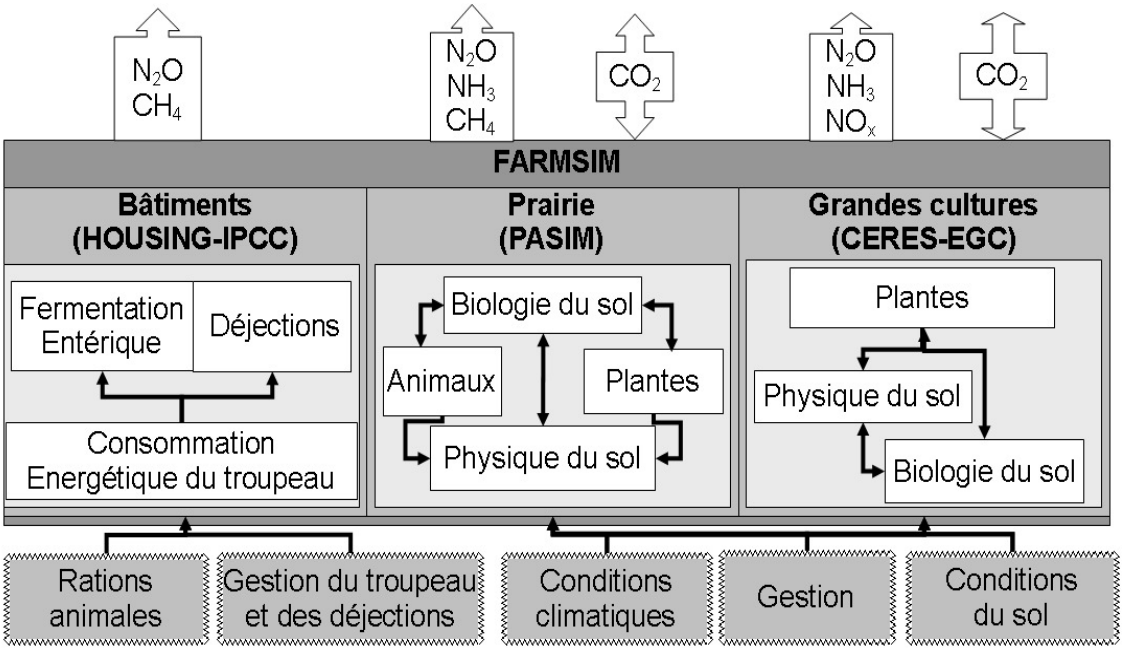


Figure 5 : Structure globale du modèle FARMSIM, faisant apparaître les trois modules constitutifs ; HOUSING-IPCC, PASIM et CERES-EGC). Le type d'information nécessaire en entrée du modèle figure en bas de la figure ; les sorties (flux GES) en haut.

Les trois modules constitutifs de FarmSim sont des modèles mécanistes ce qui implique l'existence d'un grand nombre de paramètres en entrées. Les fichiers de paramètres comportent ainsi plus de 3000 lignes et nécessitent l'utilisation d'une interface graphique permettant d'éditer ces paramètres. Cette opération pouvait s'avérer fastidieuse et était un frein à sa diffusion. Des travaux d'amélioration ont récemment été conduits afin d'améliorer ces points. Le logiciel produit est plus facilement accessible aux utilisateurs (définition des scénarios, paramétrage d'entrée). A titre d'exemple, le travail de Kpamegan (2009) a permis de modifier FarmSim afin que ce dernier accepte en entrée des fichiers XML et CSV (pour les données météo). Ces formats de fichier sont plus faciles à manipuler. De même, la sauvegarde depuis l'interface s'effectue dans ce format. Les données en entrée sont ainsi structurées de manière compréhensible et leur manipulation, même sans interface, se réalise facilement (Figure 6).

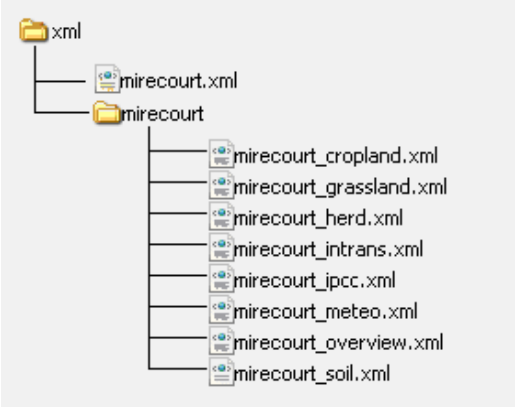


Figure 6 : Exemple d'arborescence de gestion des fichiers de paramétrage du modèle FarmSim

Dans le cas de modèles avec un très grand nombre de paramètres, la question cruciale est de déterminer le poids relatif de chacun d'entre eux. Afin d'identifier les paramètres déterminants du modèle, et donc de tenter d'en réduire le nombre, une analyse de sensibilité [Capian, 2008 ; Fusis, 2010 ; Drouet et al, 2011] a été réalisée. Cela a permis de rendre optionnel (mode expert) la saisie d'une quarantaine de paramètres du sol. En effet, nous avons montré que ces paramètres avaient peu ou pas d'impact sur les sorties, et que de plus, leur saisie était souvent réalisée via l'affectation de valeur par défaut (température moyenne de la couche limite du sol, …).

FarmSim a atteint un stade de développement permettant une utilisation aisée ainsi qu'une bonne interprétation des résultats. La ferme expérimentale INRA de Mirecourt [Fiorelli et al, 2008] située dans le Nord-Est de la France est le support actuel de sa validation. Cette ferme, d'une superficie de 100 hectares et comportant 48 vaches laitières, contient des cultures blé/maïs en rotation (24 ha). Les prairies permanentes (76 ha), quant à elles, sont soit pâturées (mi avril à fin octobre avec un gradient de pâturage allant de l'intensif vers de l'extensif) soit fauchées (ensilage). L'ensemble de ces caractéristiques permettant d'utiliser l'intégralité des fonctionnalités de FarmSim en font un cas d'étude privilégié.

La Figure 7 montre l'impact de la variabilité climatique interannuelle sur les bilans de GES au sein d'une exploitation. Ces résultats, synthétisés sur une base annuelle, sont disponibles pour chacun des éléments constitutifs du système (parcelles, troupeau, bâtiment, …). Ainsi, on a pu simuler, par rapport au cas de référence qu'est le stockage de fumier solide, une diminution de l'ordre de 1% de l'émission de CH_4 en passant à une gestion de type « diffusion de fumier journalière » ou encore à une augmentation de 146% des émissions dans le cas de stockage en bassin anaérobie. Le bilan de production de N_2O reste quant à lui stable. Il est également intéressant d'analyser l'effet sur le bilan en termes de Potentiel de Réchauffement Global (impact des gaz sur le réchauffement global) de la gestion du fumier. On constate alors des variations allant de – 2 % (diffusion de fumier journalière) à + 56 % (stockage au sein de bassin anaérobie). Les mêmes types de bilans peuvent bien sûr être réalisés par rapport à l'intensité de fertilisation.

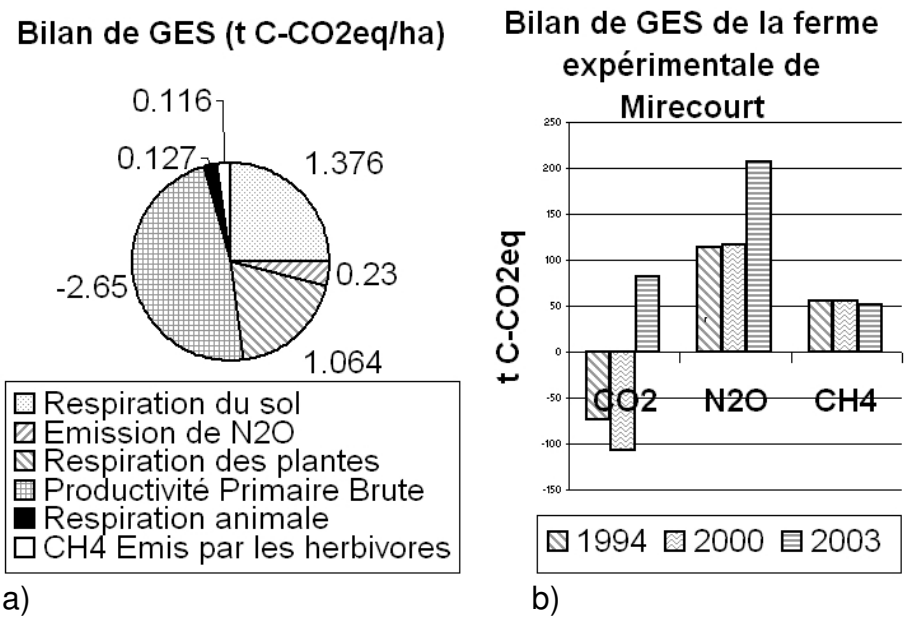


Figure 7 : Bilan des GES simulé pour le cas de la ferme expérimentale de Mirecourt, a) à l'échelle de la parcelle (PaSim) et b) à l'échelle de la ferme (FarmSim)

Le modèle FarmSim permet donc de raisonner des bilans, en regard de scénarios prédéterminées, en mettant en évidence les éléments du système d'exploitation les plus contributeurs au bilan des GES. Ce modèle, actuellement utilisé dans plusieurs projets dont l'ANR-EPAD et FP7-AnimalChange, nous permet d'appréhender les problématiques liées au changement d'échelle, éléments nécessaires pour accroître notre force de prédiction des bilans GES à une échelle globale.

Conclusion

Au cours du XXI^{ème} siècle, la production agricole sera très vraisemblablement affectée par les changements atmosphériques et climatiques. Des effets sur la production fourragère et sa répartition saisonnière, sur la valeur alimentaire de l'herbe, sur l'utilisation d'intrants (azote, eau) et sur la biodiversité des prairies sont hautement probables. Des changements des pratiques (mode d'exploitation, fertilisation) de gestion des prairies sont également prévisibles. Estimer le bilan des gaz à effet de serre de l'activité agricole dans sa plus grande diversité est plus que jamais d'actualité. Il est donc utile d'explorer dès maintenant toutes les pistes qui peuvent conduire à une meilleure adaptation au changement climatique, tout en favorisant la séquestration de carbone dans le sol par les prairies, en limitant les émissions de GES et en maintenant un niveau élevé de biodiversité. Les outils de modélisation PaSiM et FarmSim essaient, chacun à leur échelle, de répondre à ce besoin. Ces modèles sont en constante évolution et se construisent en étant confrontés aux problématiques traitées par une succession de programmes de recherche nationaux ou européens (CLIMATOR, EPAD, Carboextreme, etc…). Ces différents travaux, par leur diversité, ont permis d'atteindre la finesse de modélisation nécessaire à une estimation suffisamment précise du bilan de gaz à effet de serre. Ces modèles mécanistes, qui se focalisent sur le fonctionnement de la prairie en termes de flux de carbone et d'azote, et sur les mécanismes dans lesquelles ces flux interviennent, ont vu peu à peu leur domaine d'application évoluer du fondamental au finalisé. A tel point qu'ils peuvent être maintenant utilisés comme un outil prédictif. Dès lors, le nombre d'utilisateurs potentiels a augmenté. Ainsi, des collaborations nouvelles se développent, mobilisant les modèles pour traiter des problématiques non prises en compte initialement. Ces nouveaux développements nous conduisent à faire évoluer ces

modèles et à prendre en compte des aspects de génie logiciel propre aux produits professionnels : robustesse des exécutables, interface Homme-Machine intuitive, simplification du paramétrage. Ces modèles doivent ainsi permettre aux scientifiques et aux divers utilisateurs de co-construire une recherche finalisée, qui n'a plus pour seul objectif l'acquisition de connaissances nouvelles, mais qui permette également d'analyser les adaptations envisageables des systèmes face aux enjeux et questions de demain. L'ambition est que ces outils de recherche contribuent à faire émerger des solutions concrètes et innovantes répondant aux acteurs des territoires et des filières.

Références bibliographiques

Capian N., 2008. Sensibilité d'un modèle de bilans de gaz à effet de serre au sein d'exploitations agricoles à ses paramètres biophysiques et aux modalités de gestion des exploitations. Stage M1 Ingénierie de la Statistique, Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines.

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.

Drouet J.-L., Capian N., Fiorelli J.-L., Blanfort V., Capitaine M., Duretz v, Gabrielle B., Martin R., Lardy R., Cellier P., Soussana J.-F., 2011. Sensitivity analysis for models of greenhouse gas emissions at farm level. Case study of N2O emissions simulated by the CERES-EGC model. Environmental Pollution (accepté).

Duretz S., 2007. Modélisation des transferts d'azote et réalisation de bilans de gaz à effet de serre au sein des exploitations agricoles. Stage M2 Bioinformatique, Université de Montpellier.

Fiorelli J.-L., Drouet J.-L., Duretz S., Gabrielle B., Graux A.I., Blanfort V., Capitaine M., Cellier P., Soussana J.-F., 2008. Evaluation of greenhouse gas emissions and design of mitigation options: a whole farm approach based on farm management data and mechanistic models. Proceedings of the 8th European IFSA symposium. Clermont-Ferrand (6-10 July 2008).

Fusis C., 2010. Analyse de sensibilité d'un modèle de bilans de gaz à effet de serre au sein d'exploitations agricoles. Stage M1 Ingénierie de la Statistique, Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines.

Gabrielle B., Laville P., Duval O., Nicoullaud B., Germon J.-C., Hénault C., 2006. Process-based modelling of nitrous oxide emissions from wheat-cropped soils at the sub-regional scale. Global Biogeochemical Cycles 20, GB4018.

Graux A.-I., Gaurut M., Agabriel J., Baumont R., Delagarde R., Delaby L., Soussana J.-F., 2010. Development of the Pasture Simulation Model for assessing livestock production under climate change. Agriculture, Ecosystems and Environment (submitted).

GIEC, 2007. Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, Miller H.L. (Eds.). Rapport du Groupe de travail I - Les éléments scientifiques, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Gitay H., Brown S., Easterling W., Jallow B., 2001. Ecosystems and their goods and services. Pages 235–342 in J.J. McCarthy, O.F. Canziani, N.A. Leary, D.J. Dokken, and K.S. White, editors. Climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge and New York. 1032 pp.

IPCC, 1997. IPCC Greenhouse Gas Inventories, Revised 1996 IPCC Guidelines for Greenhouse Gas Inventories.

Kpamegan K., 2009. Evolution d'un modèle de bilan de gaz à effet de serre et refonte de son paramétrage. Stage Ingénieur ISIMA.

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. Ecological Modelling 105, 141-183.

Rolland M.N., Gabrielle B., Laville P., Serca D., Cortinovis J., Larmanou E., Lehuger S., Cellier P., 2007. Modeling of nitric oxide emissions from temperate agricultural soils, Nutrient cycling in agroecosystems 80, 75-93.

Salètes S., Fiorelli J.-L., Vuichard N., Cambou J., Olesen J.E., Hacala S., Sutton M.A., Fuhrer J., Soussana J.-F., 2004. Greenhouse gas balance of cattle breeding farms and assessment of mitigation options. In: Kaltschmitt M., Weiske A. (Eds.), Greenhouse Gas Emissions from Agriculture. Mitigation Options and Strategies. Institute for Energy and Environment, Leipzig, pp. 203-208.

Soussana J.-F., Fuhrer J., Jones M., Van Amstel A., 2007. The greenhouse gas balance of grasslands in Europe. Agriculture, Ecosystems & Environment 121, 1–4.

Soussana J.-F., Tallec T., Blanfort V., 2010. Mitigating the greenhouse gas balance of ruminant production systems through carbon sequestration in grasslands. Animal 4, 334-350.

Tubiello F.N., Soussana J.-F., Howden S., 2007. Crop and pasture response to climate change. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 104, 19686-19690.

Vuichard N., Ciais P., Viovy N., Calanca P., Soussana J.-F., 2007. Estimating the greenhouse gas fluxes of European grasslands with a process-based model: 1. Model evaluation from in situ measurements. Global Biogeochemical Cycles, 21, GBXXXX, doi:10.1029/2006GB002611.