

Proposition de thèse Cirad 2018

UPR « Recyclage et risque » et « AïDA »

Intitulé du sujet

Modélisation de l'efficacité azotée des agro-écosystèmes cannières. Application à la gestion intégrée des produits résiduels organiques sur un territoire de la Réunion.

Contexte et justification

Les pratiques agricoles agissent sur les cycles du carbone, de l'azote et du phosphore qui sont à la base des productions végétales. Une ouverture excessive de ces cycles entraîne des pertes et des gaspillages de nutriments, de matière organique des sols et d'énergie, ainsi que des problèmes de pollution de l'eau, de l'air et d'émissions de gaz à effet de serre (Soussana & Côte, 2016). Les transitions agro-écologiques visent à favoriser le bouclage des grands cycles, en combinant une série de processus : fixation biologique d'azote, stockage de carbone et de nutriments dans la matière organique des sols, et de pratiques : recyclage et valorisation agricole des engrais de ferme, intégration des systèmes de culture et d'élevage, rotations et itinéraires techniques favorisant une synchronisation de la disponibilité vis-à-vis de la demande des plantes. Le potentiel représenté par ces transitions nécessite des recherches portant notamment sur la biologie et l'écologie du sol, les interactions sol-plante ou les cycles biogéochimiques. Dans ce contexte, les approches de modélisation basées sur l'intégration de connaissances sont attendues, dans leurs dimensions descriptives, prédictives et exploratoires, afin de tester les effets de pratiques agro-écologiques. **Les modèles de culture peuvent tout à la fois accompagner les agriculteurs dans une gestion agro-écologique de leur exploitation, permettre aux scientifiques d'appréhender le fonctionnement d'agro-écosystèmes innovants ou aider les décideurs à choisir l'option la plus prometteuse sur la base d'indicateurs agro-environnementaux** (Di Paoli *et al.*, 2015).

L'utilisation des modèles de culture, dans le cadre de la transition agro-écologique, repose sur une bonne représentation des cycles de l'eau et des nutriments. Développer un modèle de culture capable de considérer des pratiques de recyclage organique apparaît comme une première étape vers une prise en compte d'autres pratiques telles que l'incorporation de plantes de services et en particulier de légumineuses. Le recyclage agricole des produits résiduels organiques (PRO) représente un levier important des transitions agro-écologiques. L'épandage de PRO permet de fournir les nutriments nécessaires à la croissance des cultures et d'améliorer les propriétés des sols en favorisant notamment le stockage de matière organique (Houot *et al.*, 2014). Malgré des surfaces épandables limitées par le relief accidenté à la Réunion (DAAF-CIRAD, 2007), la canne à sucre, qui représente 58 % de la surface agricole utile (DAAF, 2015), est la culture qui offre le plus de possibilités pour promouvoir le recyclage des déchets, dont la production est croissante du fait de la forte démographie (+1,2 %/an) et de l'impossibilité d'exporter. De par leur surface et leur besoin en nutriments (notamment azoté), les surfaces cannières représentent ainsi un potentiel recyclant majeur des PRO, dans le but de maximiser tant la productivité que l'efficacité d'utilisation des nutriments à l'échelle de la parcelle. À la Réunion, 55 % des exploitations agricoles sont de petite dimension économique et l'utilisation des PRO en complément ou substitution de la fertilisation minérale présente un intérêt économique via les économies d'engrais. L'utilisation des PRO permet en outre d'éviter les émissions de gaz à effet de serre (GES) liées à la production des engrais minéraux et à leur transport sur de longues distances. La valorisation agricole des PRO à la Réunion permettrait donc de favoriser la durabilité éco-environnementale des exploitations tout en limitant leur impact environnemental à l'échelle globale. Favoriser le développement d'une économie circulaire est un défi majeur pour l'avenir et représente à ce titre un pilier central de la transition agro-écologique à l'échelle territoriale. Les nombreux gisements de résidus issus des secteurs agricoles (ex. lisiers et fumiers), agro-industriels (ex. écumes de sucrerie, vinasses des distilleries, cendres de bagasse) et urbains (ex. boues de STEP, déchets verts) nécessitent de raisonner leurs complémentarités pour fertiliser les cultures sur l'ensemble du territoire réunionnais (ex. projet CasDar GABIR¹). Par ailleurs, le recyclage agricole des gisements organiques évoqués n'est pas sans risque d'un point de vue environnemental. En effet, l'utilisation de tels produits pourrait accroître les risques de contamination du système eau-sol-plante (ETM, contaminants organiques, volatilisation et dépôts NH₃, lixiviation NO₃) et d'émission de gaz à effet de serre (CO₂, N₂O et CH₄). Ces pratiques font l'objet d'études ciblées depuis quelques décennies et l'intégration des connaissances acquises au sein d'un modèle de culture représente aujourd'hui un enjeu important, récemment investi en milieu tempéré (e.g. Noirot-Cosson, 2017 ; Noirot-Cosson *et al.*, 2016). Dans le contexte tropical de la Réunion, **le développement d'un modèle ad hoc permettrait de raisonner l'utilisation des PRO sur la base de performances agro-environnementales, en tenant compte de la diversité des gisements organiques et des contextes pédoclimatiques de l'île.**

Dans une perspective tant institutionnelle (bio-économie circulaire) que de recherche (écologie territoriale, Buclet 2009), la gestion des PRO se doit d'être pensée à l'échelle du territoire. Reposant sur une approche participative et cherchant à optimiser les services rendus par le recyclage de résidus organiques, des scénarios de gestion intégrée de ces matières ont été élaborés pour l'agglomération de communes de l'Ouest de la Réunion dans le cadre du projet

¹ Gestion Agricole des Biomasses à l'échelle de la Réunion : vers des outils de mobilisation collective et de prospective pour une agriculture circulaire (GABIR, CASDAR)

GIROVAR². Afin de s'assurer que de tels scénarios contribuent effectivement au développement durable des territoires, il est nécessaire de les évaluer sur la base de rendements agricoles tout en tenant compte de leurs impacts environnementaux (notamment les pollutions azotées). Une évaluation environnementale de différents scénarios de GIROVAR a montré que les processus biophysiques d'émission de GES au champ présentaient une contribution au réchauffement climatique moins importante que les processus de compostage ou de production industrielle d'engrais (Dumoulin, 2016). L'importance relative de ces deux processus dits « d'élaboration » varie entre les scénarios, mais le risque de réchauffement climatique reste identique entre scénarios, de telle sorte que le principal avantage environnemental de pratiques de compostage apparait, dans cette étude, être la substitution d'une source biogénique à une source fossile. Malgré des contributions absolues moins élevées, les processus liés à l'utilisation de PRO au champ se révèlent plus « actionnables » comme en témoigne l'initiative 4 ‰ qui propose de stopper l'augmentation de la concentration de GES liée aux activités humaines dans l'atmosphère par une légère augmentation des stocks de carbone des sols. L'estimation de processus biophysiques au champ mérite une attention d'autant plus accrue qu'il s'agit très certainement d'un poste porteur d'une forte incertitude dans les analyses globales en comparaison de processus dits « d'élaboration ». **Le couplage d'un modèle biophysique, simulant le devenir de l'azote en plantation de canne à sucre, à un modèle systémique de devenir des PRO à l'échelle du territoire représente une voie prometteuse d'évaluation agro-environnementale de la gestion des PRO à la Réunion.**

Le travail proposé devrait à ce titre profiter des connaissances et des modèles déjà existants, utilisées par les unités encadrantes, sur les thématiques de transformation des PRO dans les sols, de croissance de la canne à sucre, de flux d'azote vers l'environnement et de modèles systémiques de flux de matière à l'échelle du territoire. L'approche de modélisation envisagée dans le cadre de cette thèse pourrait également trouver des applications dans les projets GABIR et PROTERR³ qui débutent et qui impliquent tous deux des approches systémiques portées par les modélisateurs de l'unité recyclage et risque.

Résumé du travail proposé

Questions et hypothèses de recherche

La thèse proposée aborde essentiellement une question d'ordre méthodologique : **une approche de modélisation à plusieurs échelles du cycle de l'azote permet-elle d'évaluer les impacts agro-environnementaux que produirait un scénario territorial visant la valorisation agronomique de résidus organiques sur les surfaces cannières ?** La question opérationnelle que l'emploi de cette méthode dans une situation concrète permet d'aborder revêt un grand intérêt pour la Réunion et les unités de recherche impliquées : le bilan agro-environnemental des scénarios de recyclage étudiés, est-il aussi positif qu'attendu ?

En intégrant des modules biophysiques dans un outil unique prenant la forme d'un modèle de culture et en couplant ce nouvel outil à un cadre d'évaluation systémique revêtant la forme d'un modèle logistique/systémique, nous pensons qu'il sera possible de transposer, à l'échelle du territoire, des indicateurs agronomiques et environnementaux pertinents au niveau parcelle. L'exercice académique, proposé dans cette thèse, se limitera aux surfaces cannières, et leur lien avec la gestion des PRO à l'échelle du territoire de l'Ouest de la Réunion.

Objectifs

L'objectif général de la thèse est de développer un outil de modélisation à plusieurs échelles du cycle de l'azote permettant d'évaluer les impacts agro-environnementaux des surfaces de cannes sucre dans le cadre de stratégies territoriales de gestion des PRO à la Réunion.

Le premier sous-objectif de la thèse sera de prédire les dynamiques du C et de N apportés avec les PRO dans les sols agricoles. Le deuxième sous-objectif consistera à estimer les effets d'apport de PRO sur les rendements en cannes à sucre et les pollutions azotées dans les agro-écosystèmes canniers. Le troisième sous-objectif sera d'évaluer les effets agronomiques et environnementaux de différents scénarios de gestion intégrée des PRO à l'échelle du territoire.

Méthodologie

1/ État des lieux, sélection des modèles biophysiques d'intérêt et stratégie d'intégration

L'approche de modélisation proposée dans cette thèse devra réaliser un couplage de trois grands processus biophysiques à l'échelle de la parcelle : la transformation des PRO dans les sols réunionnais, la simulation des flux azotés dans le sol et vers l'atmosphère, ainsi que la mobilisation des nutriments azotés par la canne à sucre en fonction de leur disponibilité. Dans la suite de cette section, des modèles candidats sont proposés, mais le choix reste volontairement ouvert. Une première étape de cette thèse sera justement la comparaison par le doctorant des différents modèles candidats, en cohérence avec les stratégies de modélisation des équipes d'accueil. Le choix des modèles devra tenir compte de leur capacité à modéliser les processus étudiés (incluant la possibilité d'éventuelles modifications), de

² Gestion Intégrée des Résidus Organiques par leur Valorisation Agronomique à la Réunion (GIROVAR, co-financement ministère de l'agriculture). Un projet multi-partenarial mis en œuvre par l'UR Recyclage & Risque en collaboration avec l'UR Green.

³ Optimisation de l'insertion des Produits Résiduaux Organiques dans les systèmes de culture comme levier des services écosystémiques rendus par les sols à l'échelle TERRitoriale (PROTERR, ADEME GRAINE, Une bioéconomie au service de la transition écologique et énergétique)

l'accès aux fichiers sources et du langage proposé, ainsi que des partenariats à construire pour ce projet de recherche. Entre autres, un des points clés sera de disposer d'un modèle de croissance de la canne à sucre qui réponde non seulement aux variables climatiques, mais également à la disponibilité en nutriments.

2/ Modéliser les transformations des PRO et les flux d'N associés dans les sols de la Réunion

Une bonne prise en compte des pratiques de fertilisation organique dans les modèles de culture repose sur le paramétrage d'un module *ad hoc* tenant compte de la diversité biochimique des gisements locaux de PRO. Le modèle TAO, candidat potentiel, pourra être paramétré à partir de cinétiques de minéralisation de C et N mesurées en conditions contrôlées de laboratoire. Les dynamiques de minéralisation de C et N des PRO disponibles sur le territoire ainsi que leur caractérisation biochimique ont été déterminées au cours de travaux précédents au sein de l'UR 78. Le sous-modèle TAO pourra être intégré dans un modèle SOL (CANTIS, MOMOS...) afin de simuler correctement les évolutions des stocks de carbone dans les sols, l'évolution des stocks de N minéral et les transferts de N dans les sols. Une validation au champ pourrait être envisagée sur le traitement sol nu de l'essai SOERE-PRO.

3/ Modéliser les flux d'azote dans le sol et la croissance de la canne à sucre à l'échelle parcelle

La communauté scientifique a développé plus de 70 modèles de cultures avec différents niveaux de complexité (Paola *et al.*, 2015). Parmi eux, quatre candidats de modèles de culture à l'échelle de la parcelle simulant la croissance de la canne à sucre ressortent : APSIM-Sugarcane (Keating *et al.*, 2003), DSSAT-Canegro (Jones *et al.*, 2003, Inman-Bamber, 1991), Mosicas (développé par l'UR 115 AIDA) et une tentative récente d'application de STICS à la canne à sucre (Valade *et al.*, 2014). APSIM (Australie), DSSAT (Afrique du Sud, USA) et STICS (France) sont trois plateformes de modélisation développées par différentes équipes de chercheurs dans le monde, chacune présentant des points forts et des faiblesses dans le cadre de ce projet. L'utilisation du modèle MOSICAS, autre candidat potentiel développé par l'UR AIDA et particulièrement bien adapté aux conditions agro-climatiques de la Réunion (démontré dans le cadre d'une comparaison des modèles MOSICAS, CANEGRO et APSIM-Sugarcane au sein du projet ICSM⁴), bénéficierait de l'expérience accumulée au sein de l'UR AIDA. Néanmoins, une limite de ce modèle est l'absence actuelle de couplage entre la disponibilité de l'N et la croissance de la canne. Le développement d'un module N sera réalisé au cours de l'année 2018 dans le cadre d'autres travaux de l'UR.

Le modèle SOL-PLANTE retenu bénéficiera pour sa calibration (et éventuels développements) du projet TERO de eRcane initié en 2014. Au sein de ce projet, quatre essais ont été installés dans différentes conditions pédo-climatiques de l'île pour évaluer l'impact de l'intensité de la fertilisation minérale, ainsi que de plusieurs alternatives de fertilisation organiques, sur les rendements et la croissance de la canne à sucre. Le modèle PRO-SOL-PLANTE pourra alors être paramétré à partir des résultats obtenus sur le cycle et les flux de N dans l'essai SOERE-PRO⁵. Une validation partielle/modulaire du modèle complet doit être proposée.

4/ Articuler le modèle de culture développé avec le modèle territorial UPUTUC

Le 3^{ème} sous-objectif est sous-tendu par l'articulation du modèle biophysique développé aux étapes 2 et 3 avec un modèle logistique de gestion des PRO à des échelles supra-parcellaires. Le modèle UPUTUC, développé dans le cadre du projet GIROVAR, permet de simuler les paramètres logistiques de scénarios de recyclage à l'échelle du Territoire de la Côte Ouest de la Réunion. Outre des indicateurs socio-économiques, il propose pour les différents scénarios une répartition (« agronomiquement optimisée ») des différents types de PRO dans les parcelles composant le territoire. Le modèle PRO-SOL-PLANTE développé au cours de la thèse pourrait utiliser les sorties d'UPUTUC et simuler les rendements et impacts environnementaux dans l'ensemble des parcelles du territoire, et ce pour les différents scénarios de gestion, afin d'apporter une dimension agro-environnementale à l'évaluation produite par UPUTUC. Les résultats d'une telle articulation permettent également d'apprécier le gain d'efficacité que permettrait d'atteindre le couplage de ces deux outils d'aide à la décision.

Relations avec le projet scientifique des unités et les axes stratégiques du Cirad

Cette thèse se trouve au cœur du projet scientifique de l'unité Recyclage et risque tant par la thématique abordée que par la démarche proposée. L'unité Recyclage et risque cherche en effet des solutions à impact environnemental contrôlé pour valoriser l'ensemble des déchets organiques et a l'ambition de faire collaborer concrètement sciences biophysiques et sciences de gestion. Pour l'unité AIDA, dont le système de culture est un thème principal, le développement de modèles permettant d'évaluer les performances de systèmes agro-écologiques innovants est une voie privilégiée afin de promouvoir l'intensification écologique et la durabilité des agro-écosystèmes. Les travaux menés dans cette thèse sur la réponse de la canne à sucre aux apports de nutriments sous la forme d'engrais ou de PRO doivent ouvrir la voie à des travaux portant sur la répartition des ressources trophiques dans des systèmes caniers intégrant des plantes de services. Disposer d'outils permettant de gérer les risques et de démontrer les bénéfices environnementaux du recyclage de résidus organiques est un élément essentiel pour la proposition des solutions recherchées, ainsi que pour la promotion de l'intensification écologique qu'elles servent. La recherche proposée contribue de ce fait aux projets des unités et à la réalisation de la stratégie et des engagements du Cirad (axe Valorisation de la biomasse et Agriculture écologiquement intensive).

⁴ International Consortium for Sugarcane Modelling (<https://sasri.sasa.org.za/agronomy/icsm/>)

⁵ Un bilan complet du cycle biogéochimique de l'azote est actuellement dressé dans cet essai pour différents modes de fertilisation organique de la canne à sucre dans le cadre de la thèse de Daniel Poultney (CIFRE Veolia, 2017-2020)

Principales publications de l'équipe d'accueil en relation avec le sujet

- Dumoulin F., Wassenaar T., Avadi A., Paillat J.-M., 2017. A framework for accurately informing facilitated regional industrial symbioses on environmental consequences. *Journal of Industrial Ecology* 21, 1049–1067.
- Feder F., Findeling A., 2007. Retention and leaching of nitrate and chloride in an andic soil after pig manure amendment. *European Journal of Soil Science* 58, 393–404.
- Martiné J.-F., 2007. Analysis and forecasting of the sucrose content of sugarcane crops during the harvest period in Reunion Island. In: 26th Congress of the International Society of Sugar Cane Technologists, Durban, South Africa, pp. 607–612
- Thuriès L., Pansu M., Feller C., Hermann P., Rémy J.-C., 2001. Kinetics of added organic matter decomposition in a Mediterranean sandy soil. *Soil Biology and Biochemistry* 33, 997–1010.
- Wassenaar T., Doelsch E., Feder F., Guerrin F., Paillat J.-M., Thuriès L., Saint-Macary H., 2014. Returning Organic Residues to Agricultural Land (RORAL)—Fuelling the follow-the-technology approach. *Agricultural Systems* 124, 60–69.

Terrains et partenaires

L'allocataire sera positionné à la Réunion au sein des UPR 78 et 115 (station de la Bretagne, Saint-Denis). Les mesures de terrain nécessaires à la calibration et à la validation des composantes du modèle de culture seront réalisées dans l'essai SOERE-PRO de La Mare et les quatre essais agronomiques du réseau TERO piloté par eRcane. Sur le terrain, l'allocataire sera appuyé par les techniciens des UR 78 & 115 et à l'occasion de nos partenaires d'eRcane et du CTICS. L'agglomération intercommunale du Territoire de la Côte Ouest (5 communes) constitue la zone territoriale d'étude concernant la dernière tache de la thèse. Le thésard bénéficiera du soutien d'agro-modélisateurs de l'UR 115, de modélisateurs biogéochimistes et systémiques de l'UR 78.

Encadrement et accueil

Équipe d'accueil

UPR 78 Recyclage et Risque, Saint-Denis, La Réunion. Encadrants principaux : A. Versini, L. Thuriès et J.C. Soulie
UPR 115 AÏDA, Saint-Denis, La Réunion. Encadrant principal : M. Christina

Candidat ciblé : sciences de l'environnement avec un intérêt pour l'interdisciplinarité et la modélisation.

Candidature

Pour toute demande d'information, vous pouvez contacter antoine.versini@cirad.fr (02 62 72 78 61) ou mathias.christina@cirad.fr (02 62 72 78 22). Les candidatures sont à envoyer à antoine.versini@cirad.fr, mathias.christina@cirad.fr, laurent.thuries@cirad.fr et jean-christophe.soulie@cirad.fr

Références

- Buclet, N., 2009. Les déclinaisons territoriales des stratégies de développement durable : à la recherche de l'espace-temps perdu. Direction de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt (DAAF), Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), 2007. Atlas des matières organiques issues des activités d'élevage et d'assainissement urbain à la Réunion, DAF Réunion, CIRAD, Saint Denis, La Réunion, 70p.
- Direction de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt (DAAF), Agreste La Réunion, 2015. Enquête sur la structure des exploitations agricoles en 2013. Le modèle agricole réunionnais résiste : l'emploi et les surfaces exploitées se stabilisent. Numéro 95, Juillet 2015.
- Di Paola A., Valentini R. & Santini M., 2015. An overview of available crop growth and yield models for studies and assessments in agriculture. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 96, 709–714.
- Dumoulin F., 2016. Evaluation environnementale d'un projet de symbiose industrielle territoriale : application à un projet de gestion territorialisée de résidus organiques valorisés en agriculture dans l'ouest de la Réunion. Thèse de doctorat, Université de La Réunion, ED Sciences, Technologies et Santé.
- Houot S., Pons M.N., Pradel M., Tibi A., Aubry C., Augusto L., Barbier R., Benoît P., Brugère H., Caillaud M.A., Casellas M., Chatelet A., Dabert P., De Mareschal S., Doussan I., Etrillard C., Fuchs J., Générumont S., Giamberini L., Hélias A., Jardé E., Le Perchec S., Lupton S., Marron N., Ménasseri S., Mollier A., Morel C., Mougín C., Nguyen C., Parnaudeau V., Patureau D., Pourcher M.-A., Rychen G., Savini I., Smolders E., Topp E., Vieublé L., Viguié C., 2014. Valorisation des matières fertilisantes d'origine résiduaire sur les sols à usage agricole ou forestier, impacts agronomiques, environnementaux, socio-économiques. Expertise scientifique collective, rapport, INRA-CNRS-Irstea (France), 930p.
- Inman-Bamber, N.G., 1991. A growth model for sugarcane based on a simple carbon balance and the CERES-maize water balance. *South African Journal of Plant Soil* 8, 93–99.
- Jones, J.W., Hoogenboom, G., Porter, C.H., Boote, K.J., Batchelor, W.D., Hunt, L.A., Wilkens, P., Singh, U., Gijsman, A.J. & Ritchie, J., 2003. The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy* 18, 235–265.
- Keating, B.A., Carberry, P.S., Hammer, G.L., Probert, M.E., Robertson, M.J., Holzworth, D., Huth, N.I., Hargreaves, J.N.G., Meinke, H., Hochman, Z., McLean, G., Verburg, K., Snow, V., Dimes, J.P., Silburn, M., Wang, E., Brown, S., Bristow, K.L.,

- Asseng, S., Chapman, S., McCown, R.L., Freebairn, D.M. & Smith, C.J., 2003. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European Journal of Agronomy* 18, 267–288.
- Noirot-Cosson P.E., Vaudour E., Gilliot J.M., Gabrielle B. & Houot S., 2016. Modelling the long term effect of urban waste compost applications on carbon and nitrogen dynamics in temperate cropland. *Soil Biology and Biochemistry* 94, 138–153.
- Noirot-Cosson P.E., 2017. Optimisation de l'insertion des Produits Résiduaux Organiques dans les systèmes de cultures d'un territoire francilien : évolution des stocks de carbone organique et substitution des engrais minéraux. Phd thesis, AgroParisTech.
- Soussana J.-F. & Côte F., 2016. Agro-écologie : Le positionnement des recherches de l'INRA et du CIRAD. Note de positionnement, octobre 2016.
- Valade, A., Ciais, P., Vuichard, N., Viovy, N., Caubel, A., Huth, N., Marin, F. & Martiné, J. F., 2014. Modeling sugarcane yield with a process-based model from site to continental scale: Uncertainties arising from model structure and parameter values. *Geoscientific Model Development* 7, 1225–1245.