

## UNITE d'ACCUEIL AU CIRAD

Nom et prénom des encadrants de thèse au CIRAD :

PAILLAT Jean-Marie ([jean-marie.paillat@cirad.fr](mailto:jean-marie.paillat@cirad.fr)) et THURIES Laurent ([laurent.thuries@cirad.fr](mailto:laurent.thuries@cirad.fr))

Fonctions : Directeur d'unité et chercheur HDR

Unité d'accueil : UPR Recyclage et risque

### ***Intitulé du sujet***

**Utilisation d'un modèle de simulation des biotransformations de la matière organique pour prédire les émissions gazeuses en cours de compostage et les caractéristiques agronomiques de composts de fumiers avicoles en situations variées**

### ***Résumé***

Le compostage est une voie intéressante de recyclage et de valorisation des matières organiques issues notamment de l'élevage. Les biotransformations lors du compostage entraînent des émissions gazeuses sources de pertes de nutriments et de carbone et de pollution atmosphérique. Maîtriser ce procédé permettrait aux agriculteurs de mieux valoriser leurs sous-produits d'élevage dans un cadre réglementaire plus adapté (norme 44-051). Pour mieux piloter les procédés de compostage, le recours à la modélisation s'avère indispensable. Aussi, des travaux de thèse, conduits précédemment par Didier Oudart ont abouti à une modélisation très originale et prometteuse (thèse Cifre avec Crête d'Or Entreprise, 2013). L'objectif de cette thèse est donc, en utilisant ce modèle de biotransformations des matières organiques, de prédire conjointement les émissions gazeuses lors du compostage et les caractéristiques des composts dans des situations très variées de compostage d'effluents d'élevage. Un enjeu fort du travail réside dans la caractérisation initiale des déchets à composter et des conditions de compostage pour paramétrer ce modèle afin de le rendre prédictif. L'utilisation du modèle dans des situations variées (climats, substrats, pratiques, usages agronomiques) nécessite de développer des connaissances spécifiques pour pouvoir (i) l'adapter rapidement à des situations variées, (ii) prédire les indicateurs pertinents pour l'usage agronomique, (iii) valider les prédictions dans des situations contrastées de terrain. Ce projet de thèse vise le soutien au développement économique du territoire par une contribution à la mise en place d'une filière de valorisation des déchets d'élevage, la substitution des engrais importés (réduction de GES), le stockage de carbone dans les sols. En optimisant le recyclage du premier gisement de matières organiques, il participe activement à la promotion d'une économie circulaire à la Réunion.

### ***Contexte et objectifs***

Le compostage est une voie intéressante de recyclage et de valorisation des matières organiques issues de l'élevage (Mustin, 1987). La stabilisation de la matière organique par ce procédé permet en effet de mieux contrôler les apports de nutriments aux cultures dans le temps et l'espace. Elle facilite également la gestion des stockages dans les exploitations d'élevage en découplant la production d'effluents de l'utilisation des fertilisants organiques qui se substituent aux fertilisants chimiques, source de consommation d'énergie et d'émission de gaz à effet de serre (GES). L'apport de compost permet une intensification écologique des systèmes de culture : augmentation de l'activité biologique et de la capacité des sols à produire, préservation des sols, meilleure rétention d'eau, stockage du carbone.

Les biotransformations lors du compostage et lors de l'épandage au champ entraînent des émissions gazeuses source de pertes de nutriments et de carbone (Sommer, 2001) et de pollution atmosphérique (Ademe, 2012) : en particulier, NH<sub>3</sub>, gaz présentant un danger pour la santé (Davidson et al., 2005), responsable de l'acidification et de l'eutrophisation des écosystèmes (Fangmeier et al., 1994 ; Krupa, 2003) et précurseur de GES et, N<sub>2</sub>O et CH<sub>4</sub> qui sont des GES (Kroeze, 1994 ; Houghton et al., 2001) dont le potentiel de réchauffement global (PRG à 100 ans) est respectivement 310 et 21 fois celui du CO<sub>2</sub>.

Maîtriser ces émissions lors de la production et de l'utilisation des composts est essentiel pour limiter les transferts de pollution vers l'atmosphère.

Ces différentes fonctions de support (cycles des nutriments), régulation (climat) et d'approvisionnement (production agricole) permises par la production et l'utilisation de compost peuvent être considérées comme des services

écosystémiques (Millenium Ecosystem Assessment, 2005). Cependant, la variété des pratiques et les différences de nature des substrats, rencontrées dans les systèmes d'élevage, modifient la vitesse de dégradation de la MO, les émissions et la qualité finale du compost. Ainsi, les composts produits présentent des propriétés très variables et leur valorisation adéquate en agriculture nécessite de connaître/prédire le plus possible la dynamique du carbone et des éléments fertilisants au cours du compostage.

**L'objectif de la thèse est donc de s'intéresser conjointement aux émissions gazeuses lors du compostage et à la caractérisation des composts obtenus en vue de leur valorisation agronomique. La prédiction de ces émissions et des caractéristiques initiales des déchets à composter constituent un enjeu clé pour mieux piloter les procédés de compostage dans l'objectif de production de composts répondant à des besoins clairement identifiés, voire à des normes.**

Une modélisation utilisant un formalisme compatible à la fois avec une représentation adaptée des biotransformations hors sol et avec l'obtention de fractions biochimiques répondant aux critères de classification des produits en vue d'un usage agronomique, est nécessaire pour mieux répondre aux acteurs du développement dans la maîtrise du compostage jusqu'à l'épandage des composts. Cette modélisation doit insister sur la prise en compte des dynamiques conjointes du C et de N et sur la définition de compartiments dynamiques pour prédire les émissions pendant le compostage.

Le travail proposé utilisera un travail antérieur de modélisation des émissions gazeuses lors du compostage, mené dans le cadre du projet ANR ISARD « Intensification écologique des Systèmes de production Agricoles par le Recyclage des Déchets » avec la thèse de Didier Oudart (CIFRE, Crête d'Or Entreprise). Cette thèse (Oudart, 2013), a permis d'analyser les interactions entre les processus biologiques, biochimiques, physicochimiques et thermodynamiques majeurs à l'origine de la stabilisation de la MO et des émissions gazeuses de CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub> et N<sub>2</sub>O. La méthode utilisée s'est appuyée sur la modélisation dynamique, semi-empirique, du procédé et sur des expérimentations sur des andains de petite taille, en se focalisant sur le compostage par aération passive en andain considéré homogène.

**Cette modélisation doit donc être poursuivie par une amélioration des résultats de calibration en incluant des méthodologies pragmatiques de caractérisation des déchets à composter.**

## **Résumé du travail proposé**

### **Questions et hypothèses de recherche**

Questions centrales : Comment représenter les processus majeurs impliqués dans les biotransformations de MO (stabilisation du C et devenir de N) pour une évaluation intégrée des procédés de compostage des effluents d'élevage incluant la valeur fertilisante et les émissions gazeuses ? Comment immobiliser et sous quelle forme physique (granulométrie) et chimique (espèces) les différentes matières (organiques et minérales N, P, K...) ? Quelles caractéristiques minimales de l'effluent initial et des procédés sont nécessaires pour prédire la variabilité des pertes de nutriments et de C, la part des pertes sous des formes polluantes ?

Enjeu 1 : Face à la diversité des situations de compostage et à la complexité des processus en jeu dans les transformations hors sol, la compréhension des facteurs principaux responsables des émissions gazeuses, des pertes de nutriments et de la stabilisation de la MO, nécessite le recours à une **modélisation prédictive** qui intègre des connaissances d'origines variées (littérature, jeux de données acquis en collaboration avec des organismes de R&D) dans l'objectif de répondre à des besoins de conseil opérationnel. Le modèle bâti par Oudart (2013) sera repris et amélioré.

Enjeu 2 : L'usage de la Spectrométrie proche infrarouge SPIR (technique non destructive) est utilisable pour le suivi au cours des biotransformations hors sol ; les données générées par les modèles statistiques prédictifs PIR peuvent être utilisées pour affiner les modèles de biotransformation (recalibration). La méthode SPIR sera utilisée et validée pour la caractérisation des déchets à composter selon les besoins de la modélisation.

Enjeu 3 : Ce modèle complet doit permettre de prédire les émissions lors de la transformation hors sol (NH<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>), la stabilisation de la MO, le stockage potentiel du C et la dynamique de l'azote prévue lors d'un apport au sol des composts obtenus. Une utilisation du modèle pour prédire l'évolution de la qualité du compost et l'intensité des émissions au cours du compostage industriel est envisagée.

Le modèle doit par exemple permettre d'apporter des réponses aux questions opérationnelles suivantes :

- En quoi la qualité du mélange ou du substrat initial est-elle importante pour minimiser les pertes gazeuses en N et maximiser la valorisation agronomique ?
- Peut-on prévoir la qualité du compost final en particulier sa valeur amendante et la disponibilité de son azote, à partir des caractéristiques initiales des déchets / effluents et des caractéristiques physiques des andains en compostage ?

## Méthodologie

- 1- Mise au point méthodologique de la mesure de la DCO sur des échantillons solides grossiers (fumiers, composts) – INSA Toulouse. Des échantillons congelés ou séchés broyés d'expérimentations précédentes ont été conservés pour des analyses ultérieures.
- 2- Mise au point méthodologique de l'acquisition de spectres PIR pour la caractérisation en cours de transformation (hors sol et sol ; échantillons bruts et échantillons conditionnés pour l'analyse chimique) – CIRAD Réunion
- 3- Calibration de modèles SPIR de prédiction de la DCO et de sa biodégradabilité – CIRAD Réunion. Un important jeu de données expérimentales existe dans les équipes concernées par ce projet de thèse au niveau mésocosme (halle expérimentale de l'INRA de Rennes) et en vraie grandeur (expérimentation en élevage à la Réunion). Outre les émissions gazeuses, les produits organiques et l'évolution de leur composition ont été caractérisés par SPIR. Des modèles de prédictions précis concernant les effluents avicoles ont été mis au point. La minéralisation des produits a également été caractérisée par des incubations et par modélisation (Rabetokotany, 2013).
- 4- Analyse du modèle de biotransformations hors-sol proposé par Oudart (2013) et comparaison avec d'autres approches de modélisation issues de la bibliographie ; en particulier, de nombreux modèles produits par les équipes concernées sont disponibles – coll. INRA-CIRAD-INSA.
- 5- Détermination du fractionnement initial de la DCO pour calibrer les paramètres d'initialisation du modèle (coll. INSA-INRA de Rennes). Analyse des possibilités de couplage avec l'utilisation du fractionnement van Soest ou directement à partir de modèles PIR. Etude des autres paramètres spécifiques liés à la physique de l'andain et aux transferts thermiques et gazeux.
- 6- Finalisation et paramétrage d'un modèle d'évolution de la MO lors du compostage jusqu'à la caractérisation du compost ; ces caractéristiques doivent correspondre aux critères utilisés par les modèles décrivant le devenir du C et de N dans les sols – coll. INRA-CIRAD-INSA. Une modélisation originale des émissions gazeuses lors du procédé de compostage a fait l'objet de la thèse de D. Oudart. Celle-ci s'appuie sur une représentation du renouvellement d'air par aération passive (la plupart des modèles existants font appel à une aération forcée peu fréquent en élevage) et un couplage des processus de transformation de l'azote et du carbone.
- 7- Validation : sur quelques situations contrastées, mesures in situ (mésocosmes en halle expérimentale ou sous tunnels en vraie grandeur) des émissions gazeuses et des biotransformations, puis mesures avec des incubations au laboratoire des produits à différents stades d'évolution du compostage – UMR SAS Rennes et CIRAD Réunion.

## Relations avec le projet scientifique de l'unité Recyclage et risque et les axes stratégiques du Cirad

Ce projet scientifique concerne directement un des thèmes de l'unité Recyclage et risque « transformation des produits résiduels organiques hors sol et dans les sols ». Les résultats attendus concernant la possibilité de simuler différentes situations de compostage alimenteront le thème « évaluation de l'impact du recyclage des PRO ». Ainsi, ce projet s'inscrit dans la suite des projets ANR Isard « Intensification écologique des systèmes de production agricoles par le recyclage des déchets » et CasDar Girovar « Gestion intégrée des résidus organiques par la valorisation agronomique à la Réunion ». La modélisation opérationnelle du compostage est un préalable à une plus grande intégration des processus biophysiques et des processus de gestion requise dans l'évaluation environnementale de scénarios de gestion des effluents d'élevage compostés à l'échelle territoriale. Cette thèse entre donc parfaitement dans la démarche de l'unité qui vise cette intégration pluridisciplinaire (<http://ur-recyclage-risque.cirad.fr/>).

Le thème concerne l'axe stratégique 1 du CIRAD « Inventer une agriculture écologiquement intensive et durable pour satisfaire les besoins actuels et futurs des populations ». La thèse contribuera à l'objectif du CIRAD visant à « Concevoir avec les acteurs des systèmes de production durables valorisant les processus biologiques et écologiques ».

## Principales publications des équipes d'accueil en relation avec le sujet

- Abd El Kader N., **Robin P.**, **Paillat J.-M.**, Leterme P. 2007. Turning, compacting and the addition of water as factors affecting gaseous emissions in farm manure composting. *Bioresource Technology* 98, 2619-2628.
- Doublet J., Francou C., Petraud J.P., Dignac M.F., Poitrenaud M., **Houot S.**, 2010. Distribution of C and N mineralization of a sludge compost within particle-size fractions. *Bioresource Technology*, 101, 4, 1254-1262.
- Doublet J., Francou C., Poitrenaud M., **Houot S.**, 2010. Sewage sludge composting: Influence of initial mixtures on organic matter evolution and N availability in the final composts. *Waste Management*, 30, 10, 1922-1930.
- Francou C., Linères M., Derenne S., Le Villio-Poitrenaud M., **Houot S.**, 2008. Influence of green waste, biowaste and paper-cardboard initial ratios on organic matter transformations during composting. *Bioresource Technology*, 99, 18, 8926-8934.
- Gabrielle, B., Da-Silveira, J., **Houot, S.**, Michelin, J., 2005. Field-scale modelling of carbon and nitrogen dynamics in soils amended with urban waste composts. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 110(3-4), 289-299.
- Hassouna M., Espagnol S., **Robin P.**, **Paillat J.-M.**, Levasseur P., Li Y., 2008. Monitoring NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> emission during pig solid manure storage: effect of turning. *Compost Science and Utilization*, 16, 4, 267-274.

- Kaboré W.T., Pansu M., Hien E., Brunet D., Barthès B.G., **Houot S.**, Coulibaly A., Zombré P., **Thuriès L.**, Masse D. (2012) 'Near Infrared Reflectance Spectroscopy applied to model the Transformation of Added Organic materials in soil.' *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 20 (3) 339-351. ([doi.org/10.1255/jnirs.999](https://doi.org/10.1255/jnirs.999))
- Lashermes G., Nicolardot B., Parnaudeau V., **Thuriès L.**, Chaussod R., Guillotin M.L., Linères M., Mary B., Metzger L., Morvan T., Tricaud A., Villette C., **Houot S.**, 2009. Indicator of potential residual carbon in soils after exogenous organic matter application. *European Journal of Soil Science*, 60, 297-310.
- Lashermes G., Nicolardot B., Parnaudeau V., **Thuriès L.**, Chaussod R., Guillotin M.L., Linères M., Mary B., Metzger L., Morvan T., Tricaud A., Villette C., **Houot S.**, 2010. Typology of exogenous organic matters based on chemical and biochemical composition to predict potential nitrogen mineralization. *Bioresource Technology*, 101, 157-164 ([doi:10.1016/j.biortech.2009.08.025](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.08.025)).
- Oudart D., **Paul E.**, **Robin P.**, **Paillat J.-M.**, 2012. Modeling organic matter stabilization during windrow composting of livestock effluents. *Environmental Technology*, 33:19, 2235-2243. ([doi.org/10.1080/09593330.2012.728736](https://doi.org/10.1080/09593330.2012.728736)).
- Paillat J.M.**, **Robin P.**, Hassouna M., Leterme P., 2005. Predicting ammonia and carbon dioxide emissions carbon and nitrogen biodegradability during animal waste composting. *Atmospheric Environment*, 39(36), 6833-6842.
- Pansu M., **Thuriès L.**, Larré-Larrouy M.-C., Bottner P., 2003. Predicting N transformations from organic inputs in soil in relation to incubation time and biochemical composition. *Soil Biology and Biochemistry*, 35, 353-363.
- Peltre C., Christensen B.T., Dragon S., Icard C., Kätterer T., **Houot S.**, 2012. RothC simulation of carbon accumulation in soil after repeated application of widely different organic amendments. *Soil Biology and Biochemistry*, 52, 49-60.
- Peltre C., **Thuriès L.**, Barthès B., Brunet D., Morvan T., Nicolardot B., Parnaudeau V., **Houot S.**, 2011. Near infrared reflectance spectroscopy: A tool to characterize the composition of different types of exogenous organic matter and their behaviour in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 43, 197-205.
- Peltre C.M., Christensen B.T., Dragon S., Icard C., Katterer T., **Houot S.**, 2012. RothC simulation of carbon accumulation in soil after repeated application of widely different organic amendments. *Soil Biology and Biochemistry* 52(0), 49-60.
- Thuriès L.**, Bastianelli D., Davrieux F., L. Bonnal, R. Oliver, Pansu M., Feller C., 2005. Prediction by NIRS of the composition of plant raw materials from the organic fertiliser industry and of crop residues from tropical agrosystems. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 13, 187-199.
- Tremier A., de Guardia A., Massiani C., **Paul E.**, Martel J.L., 2005. A respirometric method for characterising the organic composition and biodegradation kinetics and the temperature influence on the biodegradation kinetics, for a mixture of sludge and bulking agent to be co-composted. *Bioresource Technology*, 96, 169-180.
- Zhang Y., Lashermes G., **Houot S.**, Doublet J., Steyer J.P., Zhu Y.G., Barriuso E., **Garnier P.**, 2012. Modelling of organic matter dynamics during the composting process. *Waste Management*, 32, 1, 19-30.

## **Encadrement et accueil**

### **Terrains et partenaires**

La thèse est prévue sur plusieurs localisations :

- au CIRAD à la Réunion au sein du dispositif en partenariat « Services et impacts des activités agricoles en milieu tropical » pour la calibration et les mesures spectrales, les incubations en conditions contrôlées, la modélisation et la validation terrain (années 2 et 3),
- à l'INRA de Rennes pour la modélisation et les mesures en halle expérimentale (année 1).

Des séjours seront également prévus à l'INRA de Grignon pour la modélisation et le fractionnement de la MO et à l'INSA de Toulouse pour la modélisation et les mesures de DCO (année 1).

Sur le plan scientifique le partenariat existant entre l'INRA (UMR SAS et ECOSYS), le CIRAD (UPR Recyclage et risque) et l'INSA de Toulouse, éprouvé à l'occasion de plusieurs projets majeurs (ANR, CasDar, thèse D. Oudart), donne à la thèse une originalité en termes de regroupement de compétences nécessaires à ce travail de modélisation.

### **Equipes d'accueil**

*CIRAD Persyst :*

UPR 78 Recyclage et Risque, Saint-Denis, La Réunion. Encadrant principal : Jean-Marie Paillat

*INRA Environnement Agronomie :*

UMR SAS Sols Agro&hydro système Spatialisation, Rennes. Encadrant principal : Paul Robin

UMR ECOSYS Écologie fonctionnelle et écotoxicologie des agroécosystèmes, Grignon.

Encadrant principal : Sabine Houot

## **Direction et encadrement de thèse et écoles doctorales proposées**

Etienne PAUL (Pr INSA LIBSP Toulouse), Ecole doctorale MEGEP Toulouse	accord
Jean-Marie PAILLAT (HDR CIRAD UPR recyclage et risque), Ecole doctorale STS de la Réunion	accord
Laurent Thuriès (HDR CIRAD, UPR Recyclage et risque St Denis Réunion)	accord
Paul Robin (CR1 INRA, UMR SAS Rennes)	accord
Sabine Houot (DR INRA, UMR EGC Grignon)	accord

### Aspects administratifs

Dans un premier temps, le candidat devra envoyer un CV détaillé et une lettre de motivation à l'équipe d'encadrement avant le **10 juin 2016** ; ces documents doivent être adressés à :

[paul@insa-toulouse.fr](mailto:paul@insa-toulouse.fr) ; [jean-marie.paillat@cirad.fr](mailto:jean-marie.paillat@cirad.fr) ; [Paul.Robin@rennes.inra.fr](mailto:Paul.Robin@rennes.inra.fr) ; [laurent.thuries@cirad.fr](mailto:laurent.thuries@cirad.fr) ; [houot@grignon.inra.fr](mailto:houot@grignon.inra.fr)

Dans un second temps, l'acte de candidature (voir critères spécifiques de la Région Réunion) sera à faire par le candidat retenu avant le 15/07/2016 sur le site de la Région Réunion.

<http://arr.regionreunion.com/>

La demande de financement, avec le dossier complet (voir pièces justificatives nécessaires), devra être déposée à la Région Réunion avant le 15/07/2016. La commission d'attribution des bourses doctorales se réunissant en septembre, la thèse, si elle est retenue par la commission, est normalement prévue pour un démarrage vers décembre 2016.

<http://recherche.univ-reunion.fr/ecoles-doctorales/les-financements/lallocation-regionale-de-formation-doctorale/>

A titre d'information, le dossier 2016 qui devrait être actualisé sur le site de la Région Réunion prochainement :

[http://arr.regionreunion.com/ARR/annexes/ARR\\_NoticeExplicativeSession-2016.pdf](http://arr.regionreunion.com/ARR/annexes/ARR_NoticeExplicativeSession-2016.pdf)

L'allocation régionale mensuelle est d'environ 1200 € net. Une inscription à l'université de la Réunion sera sans doute préférée par la Région Réunion. Cette allocation est généralement complétée par le CIRAD pour atteindre le niveau de rémunération officiel des thèses du ministère de la recherche. Le fonctionnement de la thèse sera assuré par les projets de recherche de l'unité d'accueil et par l'attribution d'une allocation maximale annuelle de 3000 € par la direction générale déléguée à la recherche et à la stratégie du CIRAD.

### Références citées

Ademe, 2012. Programme de recherche de l'Ademe sur les émissions atmosphériques du compostage. Connaissances

acquises et synthèse bibliographique. Disponible en ligne, [www.ademe.fr](http://www.ademe.fr), rubrique Médiathèque.

AFNOR, 2005a. XP U 44-162 - Amendements organiques et supports de culture - Caractérisation de la matière organique par fractionnement biochimique et estimation de sa stabilité biologique - Soil improvers and growing media - Characterization of organic matter by biochemical fractioning and estimation of its biological stability. In: Afnor (Ed.), Saint Denis la Plaine, pp. 19p.

AFNOR, 2005b. XP U 44-163 - Amendements organiques et supports de culture - Détermination du potentiel de minéralisation du carbone et de l'azote - Méthode d'incubation en conditions contrôlées. Soil improvers and growing media - Characterization of organic matter by potential mineralization of carbon and nitrogen. In: AFNOR (Ed.), Paris.

Bernal M.P., Navarro A.F., Sanchez-Monedero M.A., Roig A., Cegarra J., 1998b. Influence of sewage sludge compost stability and maturity on carbon and nitrogen mineralization in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 30, 305-313.

Bernal M.P., Sanchez-Monedero M.A., Paredes C., Roig A., 1998a. Carbon mineralization from organic wastes at different composting stages during their incubation in soil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 69, 175-189.

Davidson, C.I., Phalen, R.F., Solomon, P.A., 2005. Airborne particulate matter and human health: A review. *Aerosol Science and Technology* 39, 737-749.

Fangmeier, A., Hadwiger-Fangmeier, A., van der Eerden, L., Jäger, H.-J., 1994. Effects of atmospheric ammonia on vegetation - A review. *Environmental Pollution* 86, 43-82.

Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., Van der Linden, P.J., Dai, X., Maskell, K., Johnson, C.A., 2001. Climate change 2001: the scientific basis. Report of the IPCC working group I.

Kroeze, C., 1994. Nitrous oxide and global warming. *The Science of The Total Environment* 143 (2-3), 193-209.

Krupa, S.V., 2003. Effects of atmospheric ammonia (NH3) on terrestrial vegetation: a review. *Environmental Pollution* 124, 179-221.

Manzoni, S., Porporato, A., 2009. Soil carbon and nitrogen mineralization: Theory and models across scales. *Soil Biology and Biochemistry* 41(7), 1355-1379.

Mustin M., 1987. Le compost. Gestion de la matière organique, Tec & Doc, Paris.

Paillat J.M., Robin P., Hassouna M., Leterme P., 2005. Predicting ammonia and carbon dioxide emissions carbon and nitrogen biodegradability during animal waste composting. *Atmospheric Environment*, 39(36), 6833-6842.

- Pommier S., Chenu D., Quintard M., Lefebvre X., 2008. Modelling of moisture-dependent aerobic degradation of solid waste. *Waste Management*, 28, 1188-1200.
- Sommer, S.G., 2001. Effect of composting on nutrient loss and nitrogen availability of cattle deep litter. *European Journal of Agronomy* 14 (1), 123-133.
- Van Soest, P.J., 1963. Use of detergents in the analysis of fibrous feeds. II—A rapid method for the determination of fibre and lignin, *J. Assoc. Off. Anal. Chem.* 46 (1963), pp. 829–835.
- Vlyssides A., Mai S., Barampouti E.M., 2009. An integrated mathematical model for co-composting of agricultural solid wastes with industrial waste water. *Bioresource Technology*, 100, 4797-4806.