

**Nutrient recovery from bio-digestion waste:  
From field experimentation  
to model-based optimization**

**Thèse en cotutelle  
Doctorat en génie des eaux**

**Céline Vaneekhaute**

Université Laval  
Québec, Canada  
Philosophiae Doctor (Ph.D.)

et

Université de Gand  
Gand, Belgique  
Docteur

**French translation of the title:**

Récupération des nutriments à partir des déchets de la bio-digestion:  
De l'expérimentation sur le terrain à l'optimisation à base de modèles

**Dutch translation of the title:**

Nutriëntre recuperatie uit afval van biovergisting:  
Van veldexperiment tot modelgebaseerde optimalisatie

**Reference to this thesis:**

Vaneeckhaute, C., 2015. Nutrient recovery from bio-digestion waste: From field experimentation to model-based optimization. Joint PhD thesis, Faculty of Bioscience Engineering, Ghent University, Ghent, Belgium, and Faculté des Sciences et de Génie, Université Laval, Québec, Canada.

**Supervisors:**

Prof. dr. ir. Filip Tack  
Prof. dr. ir. Erik Meers (co-supervisor)  
Department of Applied Analytical and Physical Chemistry  
Laboratory of Analytical Chemistry and Applied Ecochemistry  
Ghent University, Ghent, Belgium

Prof. dr. ir. Peter Vanrolleghem  
modelEAU  
Département de génie civil et de génie des eaux  
Université Laval, Québec, Canada

Dr. ir. Evangelina Belia (co-supervisor)  
Primodal Inc.  
Québec, Canada

**Dean:**

Prof. dr. ir. Guido Van Huylenbroeck (Ghent University)  
Prof. dr. ir. André Darveau (Université Laval)

**Rector:**

Prof. dr. ir. Anne De Paepe (Ghent University)  
Prof. dr. Denis Brière (Université Laval)

The author and supervisors give the authorization to consult and copy parts of this work for personal use only. Every other use is subjected to copyright laws. Permission to reproduce any material contained in this work should be obtained from the author.

## Résumé

---

La prise de conscience croissante de l'épuisement des ressources naturelles, la demande croissante de nutriments et d'énergie pour la production alimentaire et les normes de plus en plus strictes de décharge des nutriments et de fertilisation, ont donné lieu à une attention accrue pour la récupération des nutriments à partir des déchets municipaux et agricoles. Cette thèse de doctorat vise à stimuler la transition vers une bio-économie en fournissant des (moyens à développer des) stratégies durables pour la récupération des nutriments à partir des déchets organiques après la production de bio-énergie par la digestion anaérobie. Une attention particulière est accordée à la valorisation des produits récupérés comme substituts renouvelables aux engrais chimiques et/ou comme engrais organo-minéraux durables dans l'agriculture. Trois phases de recherche complémentaires ont été exécutées: 1) l'inventaire des technologies et la classification des produits, 2) l'évaluation de la valeur des produits, 3) la modélisation et l'optimisation des procédés.

Dans la première phase, une revue systématique des technologies et une classification des produits ont été réalisées. Dans la seconde phase, la caractérisation des produits et des analyses de bilan de masse dans des stations de récupération des ressources de l'eau et des déchets (StaRRED) à grande échelle ont été exécutées. Une évaluation économique et écologique de différents scénarios de bio-fertilisation a été menée et les scénarios les plus durables ont été sélectionnés pour une évaluation agronomique réalisée ultérieurement sur le terrain et à l'échelle de la serre. Dans la troisième phase, une librairie générique de modèles pour la récupération des nutriments a été élaborée visant à modéliser la quantité et la qualité d'engrais. Une meilleure compréhension de la performance et des interactions des processus unitaires a été obtenue par des analyses de sensibilité globale. Les modèles ont été utilisés avec succès comme un outil pour la configuration et l'optimisation des chaînes de traitement. Sur la base de toutes les connaissances acquises, une feuille de route générique pour la mise en place des stratégies de récupération des nutriments en fonction des marchés et des législations des engrais, et de la caractérisation des déchets a été développée.

En tant que telle, la présente thèse développe les concepts de fermeture maximale des cycles des nutriments dans une approche du berceau-au-berceau. Le travail apporte des preuves importantes de l'impact positif des produits récupérés sur l'économie, l'agronomie et l'écologie de la production végétale intensive. En outre, cette thèse offre des informations et des outils fondamentaux pour faciliter la mise en œuvre et l'optimisation des stratégies durables de récupération des nutriments. Ces résultats ouvrent de nouvelles possibilités pour une croissance économique durable axée sur les ressources biologiques et créent ainsi une situation gagnant-gagnant pour l'environnement, la société et l'économie en Belgique, au Canada, et au-delà.

## Summary

---

The increasing awareness of natural resource depletion, the increasing demand of nutrients and energy for food production, and the more and more stringent nutrient discharge and fertilization levels, have resulted in an increased attention for nutrient recovery from municipal and agricultural wastes. This PhD dissertation aims at stimulating the transition to a bio-based economy by providing (tools to develop) sustainable strategies for nutrient recovery from organic wastes following bio-energy production through anaerobic digestion (= bio-digestion waste). Particular attention is paid to the valorization of the recovered products as renewable substitutes for chemical fertilizers and/or as sustainable organo-mineral fertilizers in agriculture. Three complementary research phases were conducted: 1) technology inventory and product classification, 2) product value evaluation, 3) process modelling and optimization.

In the first phase, a systematic technology review and product classification was performed. In phase 2, product characterizations and mass balance analyses at full-scale waste(water) resource recovery facilities (WRRFs) were executed. An economic and ecological evaluation of different bio-based fertilization scenarios was conducted and the most sustainable scenarios were selected for subsequent agronomic evaluation at field and greenhouse scale. In phase 3, a generic nutrient recovery model library was developed aiming at fertilizer quantity and quality as model outputs. Increased insights in unit process performance and interactions were obtained through global sensitivity analyses. The models were successfully used as a tool for treatment train configuration and optimization. Based on all acquired knowledge, a generic roadmap for setting up nutrient recovery strategies as function of fertilizer markets, legislations, and waste characterization was established.

As such, the present dissertation further develops the concepts of maximally closing nutrient cycles in a cradle-to-cradle approach. The work reveals important evidence of the positive impact of recovered products on the economy, agronomy, and ecology of intensive plant production. Moreover, it provides the fundamental information and tools to facilitate the implementation and optimization of sustainable nutrient recovery strategies. All of this may open up new opportunities for sustainable and more bio-based economic growth and thus create a win-win situation for the environment, the society, and the economy in Belgium, Canada, and beyond.