



HAL
open science

Codigestion : Prédiction de la production de méthane en mode continu à partir des données cinétiques des substrats acquises en mode batch

Mokhles Kouas, Jérôme Harmand, Philippe Sousbie, Jean-Philippe Steyer, S. Sayadi, Michel Torrijos

► To cite this version:

Mokhles Kouas, Jérôme Harmand, Philippe Sousbie, Jean-Philippe Steyer, S. Sayadi, et al.. Codigestion : Prédiction de la production de méthane en mode continu à partir des données cinétiques des substrats acquises en mode batch. Journées de la Méthanisation : Applications Agricoles et Industrielles, Moletta Méthanisation. FRA., Dec 2016, Chambéry, France. hal-01607664

HAL Id: hal-01607664

<https://hal.science/hal-01607664>

Submitted on 3 Jun 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.

Codigestion : Prédiction de la production de méthane en mode continu à partir des données cinétiques des substrats acquises en mode batch

M. Kouas^(1,2), J. Harmand⁽¹⁾, P. Sousbie⁽¹⁾, J-P Steyer⁽¹⁾, S. Sayadi⁽²⁾, M. Torrijos⁽¹⁾

⁽¹⁾ LBE, INRA, 102, Avenue des Etangs, 11100, Narbonne, France

⁽²⁾ Laboratoire des Bioprocédés Environnementaux, LMI COSYS-Med, Centre de Biotechnologie de Sfax, BP1177, Sfax, Tunisie

Introduction

La codigestion de résidus solides (Fraction fermentescible des ordures ménagères, résidus des industries agro-alimentaires, résidus agricoles, boues résiduaires, ...) fait l'objet d'une attention croissante car c'est un moyen de produire une énergie renouvelable, le biogaz, et un fertilisant, le digestat, tout en éliminant les déchets et sous-produits [1]. La codigestion peut permettre d'améliorer les performances du procédé de méthanisation et présente des avantages sur différents plans : écologique, technologique et économique [2]. Les applications de la codigestion concernent aussi bien les petites unités de méthanisation à la ferme, essentiellement réalisées à partir de déjections d'élevage (fumiers, lisiers, ...), que les installations centralisées de taille plus importante traitant des résidus d'origines diverses (industrielle, agro-alimentaire, agricole). L'application de modèles mathématiques à la digestion anaérobie est utilisée pour optimiser le procédé, contrôler le fonctionnement des digesteurs, formuler et valider des hypothèses pour mieux comprendre la réaction de méthanisation.

Un modèle simple permettant de simuler la production de méthane d'un réacteur de codigestion a été développé par [8]. Ce modèle a été construit à partir des paramètres spécifiques de chaque substrat déterminés en mode batch (BMP et cinétiques de dégradation) [3–5]. Le principal objectif du travail dont les premiers résultats sont présentés dans cette publication était de valider l'utilisation du modèle pour la simulation du fonctionnement d'un réacteur de codigestion fonctionnant en continu et de déterminer le domaine de validité du modèle. L'intérêt de cette modélisation est qu'elle permet d'optimiser les mélanges de cosubstrats, de suivre spécifiquement le comportement de chaque sous-fraction et de déterminer à partir de quelle charge organique le substrat apporté n'est pas complètement dégradé. Le but final est de développer un outil simple destiné aux bureaux d'étude et aux industriels qui permette d'optimiser l'alimentation de digesteurs en codigestion (« recette »).

Matériels et Méthodes

Pour réaliser les essais en batch et en continu, des réacteurs en verre à double enveloppe ont été utilisés. Les réacteurs ont un volume utile de 6 litres. Ils sont agités par agitation magnétique ou mécanique et thermostatés à 37 °C (mésophile) par recirculation d'eau dans la double enveloppe. Les réacteurs sont équipés d'un système de mesure en ligne du volume de biogaz produit à l'aide de débitmètres volumiques Ritter (milligas counter MGC-1 V3.1) et du logiciel Odin-Silex, logiciel qui a été développé au laboratoire pour l'acquisition des données en ligne. Les réacteurs sontensemencés à une concentration de 15g MES/L avec de la boue anaérobie granulaire prélevée dans un réacteur anaérobie à lit de boues « upflow anaerobic sludge blanket » (UASB) traitant les effluents d'une raffinerie de sucre située à Marseille.

Afin de déterminer les paramètres cinétiques de chaque substrat qui seront utilisés pour modéliser les réacteurs en continu, des batchs successifs ont été effectués (6 à 8 batchs) avec ajout de 1 g

MV du substrat/L soit un rapport S_0/X_0 de 0.07 g MV/g MVS. Pour les réacteurs continus chaque réacteur a été alimenté 5 fois par semaines à des charges organiques croissantes. Les différents réacteurs ont été alimentés avec :

- Des substrats individuels : Carotte, banane, pomme de terre et chou à des charges appliquées de 0,5 ; 1 ; 1,5 g MV/L/j,
- Des mélanges de 2 substrats : carotte (50% en masse brute) + chou (50%), steak haché (30%) + Tomate (70%) à des charges appliquées de 0,5 ; 1 ; 1,5 ; 2 ; 2,25 et 2,5 g MV/L/j.

Le suivi du fonctionnement des différents réacteurs a été réalisé en mesurant la concentration en acides gras volatils (AGV), la DCO soluble, le pH, l'alcalinité totale, le volume de biogaz produit et sa composition en méthane.

Résultats et discussions

Identification des paramètres cinétiques des substrats en mode fed-batch et développement d'un modèle simple

Un modèle simple a été développé pour prédire la production de méthane d'un réacteur de codigestion en mode continu en utilisant les caractéristiques cinétiques de dégradation de chaque substrat acquis en mode batch. Ce modèle inclut une compartimentation de la matière organique en sous-fractions possédant des vitesses de dégradation différentes. Une sous-fraction « i » est caractérisée par 2 paramètres : la constante de dégradation k_i et sa concentration initiale $S_i(0)$, avec l'hypothèse que la cinétique d'une sous-fraction est d'ordre zéro ($dS_i/dt = -k_i$). Ces 2 paramètres sont exprimés en équivalent méthane c'est-à-dire en ml de CH_4/h pour k_i et en ml de CH_4 pour S_i . Les paramètres cinétiques sont déterminés à partir de la courbe de production nette de méthane (c'est-à-dire après soustraction de la respiration endogène) obtenue en réacteur batch alimenté à une charge organique de 1g MV/L. Ces réacteurs ont fonctionné en mode fed-batch afin de permettre l'acclimation entre les boues et les substrats.

Certains auteurs [3, 5, 6] ont utilisé des modèles incluant un fractionnement de la matière organique en deux sous fractions uniquement : fractions rapidement et lentement biodégradables. Dans cette étude, les compartimentations en 2, 3 ou 4 sous-fractions ont été comparées afin de déterminer le fractionnement optimal. Pour déterminer le nombre optimal de sous-fractions, des indices d'approximation ont été calculés qui montrent que le fractionnement en 3 sous-fractions permet d'améliorer très nettement la capacité prédictive du modèle par rapport à un fractionnement en deux sous-fractions, alors que le fractionnement en 4 sous-fractions ne permet pas d'améliorer significativement le modèle par rapport à 3 sous-fractions tout en le compliquant. Pour un substrat donné, la production de méthane observée en batch est donc la résultante de la dégradation simultanée de 3 sous-fractions, chacune selon un ordre 0.

La production de méthane du réacteur est :

$$\text{Eq (1): Méthane produit à } t = \sum k_i * t = k_1 * t + k_2 * t + k_3 * t \quad (k_i: \text{ml } CH_4/h)$$

La concentration résiduelle de chaque fraction du substrat suit les équations suivantes :

$$\text{Eq (2): } S_1(t) = \max(S_1(0) - k_1 * t, 0)$$

$$\text{Eq (3): } S_2(t) = \max(S_2(0) - k_2 * t, 0)$$

$$\text{Eq (4): } S_3(t) = \max(S_3(0) - k_3 * t, 0)$$

La concentration résiduelle totale en substrat est donnée par :

$$\text{Eq (5): } \dot{S}(t) = \sum S_i(t) = S_1(t) + S_2(t) + S_3(t)$$

$S_i(0)$ est la quantité de substrat de la sous-fraction i à l'instant $t=0$. Elle est exprimée en ml de CH_4 . $S_i(0)$ représente donc le volume de méthane qui sera produit lors de la dégradation de cette sous-fraction et la somme des $S_i(0)$ représente la quantité de méthane maximale produite par la dégradation complète du substrat. Le volume de méthane produit à un instant t suite à la dégradation de la sous-fraction i est égal au produit $k_i \cdot t$.

Le modèle a été appliqué à 60 substrats afin de construire une base de données contenant les paramètres cinétiques et le BMP de chaque substrat individuellement, données qui ont été utilisées pour la modélisation des réacteurs fonctionnant en mode continu.

Validation du modèle en mode continu

Le modèle simple développé a été utilisé pour simuler la production de méthane de réacteurs alimentés en continu en utilisant les paramètres acquis en mode batch pour chaque substrat (BMP, 3 k_i , 3 S_i).

Dans un premier temps, 4 réacteurs ont été alimentés en continu avec des monosubstrats (carotte, banane, pomme de terre et chou) à des charges appliquées croissantes (0,5 ; 1 ; 1,5 ; 2 ; 2,25 et 2,5 g MV/L/j). Les courbes expérimentale et modélisée ont été comparées statistiquement et une bonne corrélation a été trouvée entre le modèle et le cumul expérimental de la production de méthane. Par exemple, pour le substrat carotte, le réacteur a été alimenté à des charges appliquées de 0,5 ; 1 et 1,5 g MV/L/j et les rendements expérimentaux en méthane sont respectivement de 315, 270 et 267 ml CH_4 /g MV et les rendements modélisés sont de 310, 283 et 266 ml CH_4 /g MV respectivement pour les 3 charges appliquées.

Dans un deuxième temps, des réacteurs ont été alimentés en codigestion avec des mélanges de 2 substrats : carotte + chou, steak haché + Tomate et tomate + fumier pailleux.

Dans ce manuscrit, seuls les résultats du mélange carotte + chou sont détaillés à titre d'exemple (Fig 1). Chaque substrat est modélisé séparément en fonction de la quantité de MV ajoutée et les résultats sont ensuite additionnés. La discussion porte sur la comparaison de la production globale de méthane par semaine expérimentale et modélisée en fonction de la charge appliquée ainsi que sur la comparaison des cinétiques de production du méthane au cours d'une semaine. La figure 1 représente la courbe de production nette de méthane en fonction du temps à différentes charges appliquées avec en comparaison, la courbe reconstruite avec le modèle à partir des données de chaque substrat acquises en mode batch. Pour évaluer le modèle un pourcentage de différence a été calculé[5] sur la production totale de méthane au cours d'une semaine et un pourcentage de différence maximal de 10 % a été fixé pour que la prédiction soit jugée acceptable [7]. Dans le cas du mélange carotte + chou, la prédiction de la production totale de méthane par semaine par le modèle est de -6%, 0%, -1%, -1%, -5% et -8% par rapport aux valeurs expérimentales, respectivement pour des charges appliquées de 0,5 ; 1 ; 1,5 ; 1,75 ; 2 et 2,25 g MV /L/j (voir fig 1 a) b) c) d) e) f)). Ces résultats montrent que le modèle permet une estimation très correcte du cumul expérimental de méthane par semaine avec des pourcentages d'erreur inférieurs à 10%. Le modèle prédit également bien la cinétique de dégradation au cours de la semaine pour les charges appliquées de 0,5 ; 1 ; 1,5 et 1,75 g MV/L/j. Cependant, pour les plus fortes charges appliquées (2 et 2,25 g MV/L/j) une différence plus importante apparaît, en particulier vers la fin de la semaine (Fig 1e) et f)). Pour améliorer la capacité prédictive du modèle pour les plus fortes charges appliquées, des tests de calibration et d'optimisation ont été effectués en augmentant la valeur k_3 qui correspond à la cinétique de dégradation de la fraction la plus lentement biodégradable. Les figures 2-a et 2-b montrent que la multiplication par 2 du paramètre k_3 des deux substrats a permis une amélioration très significative de la prédiction de la cinétique de production de méthane au cours du temps. Ce résultat suggère qu'une augmentation des cinétiques de

dégradation des substrats les plus lentement biodégradables est observée pour les charges appliquées les plus élevées.

Les résultats obtenus montrent qu'il est possible de prédire d'une manière précise la production totale nette de méthane au cours d'une semaine ainsi que les cinétiques de production. Cependant, cela ne permet pas de simuler le comportement global du digesteur incluant la respiration endogène. Pour prédire le volume total de méthane produit par un digesteur des essais de modélisation ont été effectués en utilisant les données cinétiques calculées à partir de la courbe brute obtenue en mode batch et non plus la courbe nette (sans respiration endogène). Dans un premier temps, les paramètres k_i et S_i ont été déterminés pour les deux substrats à partir des courbes batch brutes. Les données expérimentales de production brute de biogaz en codigestion en mode continu ont été comparées avec les données modélisées (fig. 3). Les résultats montrent une bonne prédiction de la production totale de méthane du réacteur pour les charges appliquées les plus faibles (0,5 ; 1 et 1,5 g MV /L/j) avec des pourcentages d'erreur inférieurs à 10%. Cependant, avec l'augmentation de la charge appliquée, on note des pourcentages d'erreur supérieurs à 10% par rapport aux valeurs expérimentales avec respectivement -15, -14, et -17% pour les charges appliquées de 1,75 ; 2 et 2,25 g MV /L/j ainsi qu'une mauvaise prédiction de l'évolution de la production de méthane au cours de la semaine. Comme précédemment, la multiplication par 2 des valeurs des k_3 à ces charges a permis d'améliorer grandement la prédiction du volume de méthane produit ainsi que de représenter d'une manière beaucoup plus précise l'évolution de la production de méthane en cours de semaine (fig. 4).

En perspectives, le modèle sera appliqué pour des mélanges de 3 et 5 substrats et ultérieurement sur des déchets plus complexes tels que la fraction organique de déchets ménagers.

Références

- [1] G. Silvestre, B. Fernández, A. Bonmatí, Addition of crude glycerine as strategy to balance the C/N ratio on sewage sludge thermophilic and mesophilic anaerobic co-digestion, *Bioresour. Technol.* 193 (2015) 377–385.
- [2] J. Mata-alvarez, J. Dosta, S. Macé, S. Astals, Codigestion of solid wastes : A review of its uses and perspectives including modeling, 31 (2011) 99–111.
- [3] H. Yasui, R. Goel, Y.Y. Li, T. Noike, Modified ADM1 structure for modelling municipal primary sludge hydrolysis, *Water Res.* 42 (2008) 249–259.
- [4] R. Girault, G. Bridoux, F. Nauleau, C. Poullain, J. Buffet, J.P. Steyer, A.G. Sadowski, F. Béline, A waste characterisation procedure for ADM1 implementation based on degradation kinetics, *Water Res.* 46 (2012) 4099–4110.
- [5] S. García-Gen, P. Sousbie, G. Rangaraj, J.M. Lema, J. Rodríguez, J.-P. Steyer, M. Torrijos, Kinetic modelling of anaerobic hydrolysis of solid wastes, including disintegration processes., *Waste Manag.* 35 (2015) 96–104.
- [6] A. Mottet, I. Ramirez, H. Carrère, S. Déléris, F. Vedrenne, J. Jimenez, J.P. Steyer, New fractionation for a better bioaccessibility description of particulate organic matter in a modified ADM1 model, *Chem. Eng. J.* 228 (2013) 871–881.
- [7] H. Yazidi, J. V. Thanikal, *International Journal of Advanced Research in Biological Sciences* Non-linear kinetic modelling of anaerobic biodegradation of fruit and vegetable waste together with cooked oil, 3 (2016) 109–121.
- [8] M. Kouas, M. Torrijos, P. Sousbie, J.P. Steyer, S. Sayadi, J. Harmand, Robust assessment of both biochemical methane potential and degradation kinetics of solid residues in fed-batch conditions, *Chem. Eng. J.* En cours de publication 2016.

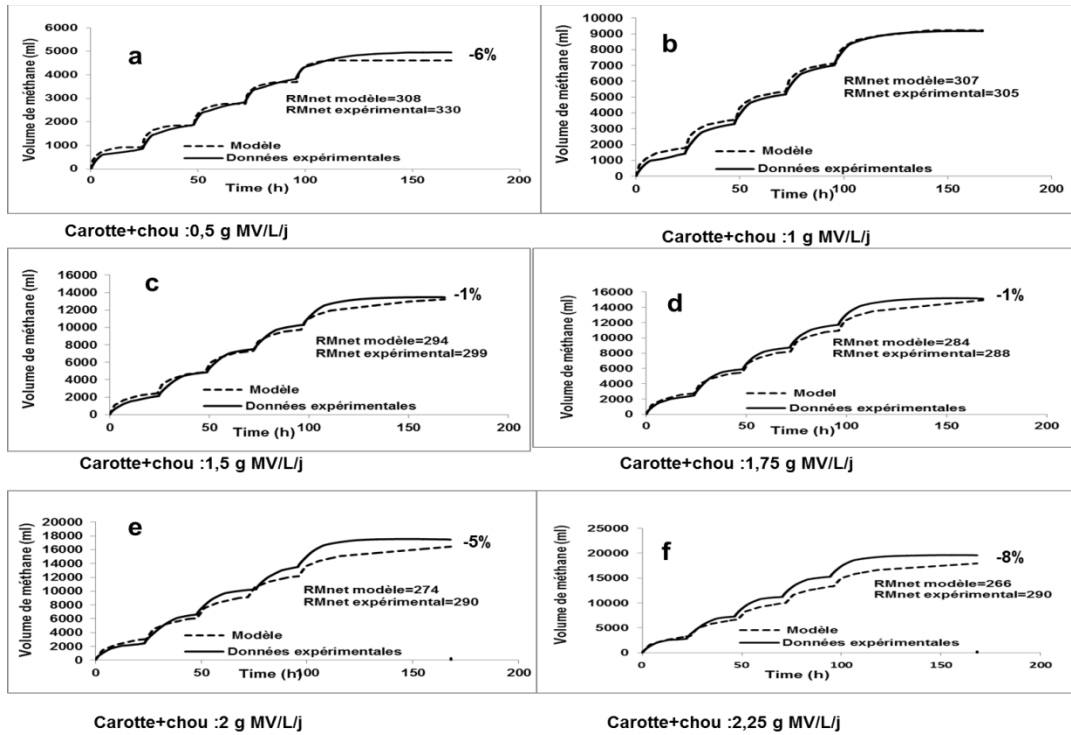


Fig. 1 : Comparaison entre les données expérimentales nettes et les données modélisées pour le mélange carotte + chou à des charges appliquées croissantes.

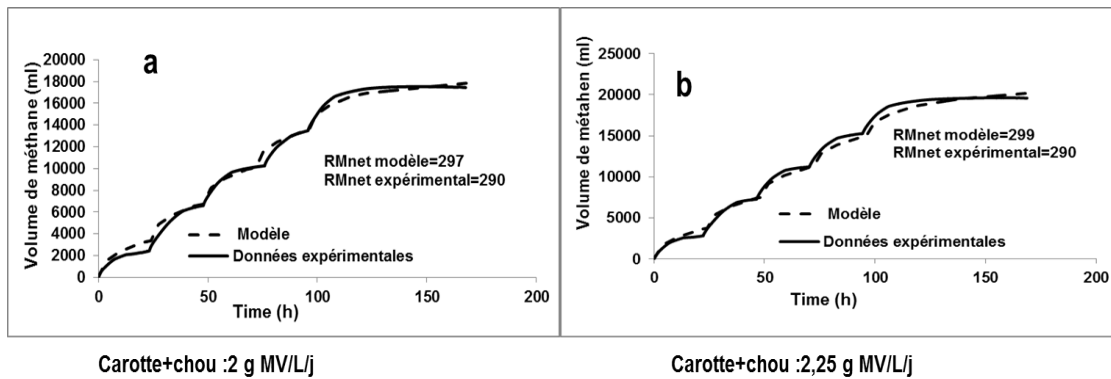


Fig. 2 : Comparaison entre les données expérimentales nettes et les données modélisées pour le mélange carotte + chou après augmentant des k_3 : a) 2g MV/L/j et b) 2.25g MV/L/j.

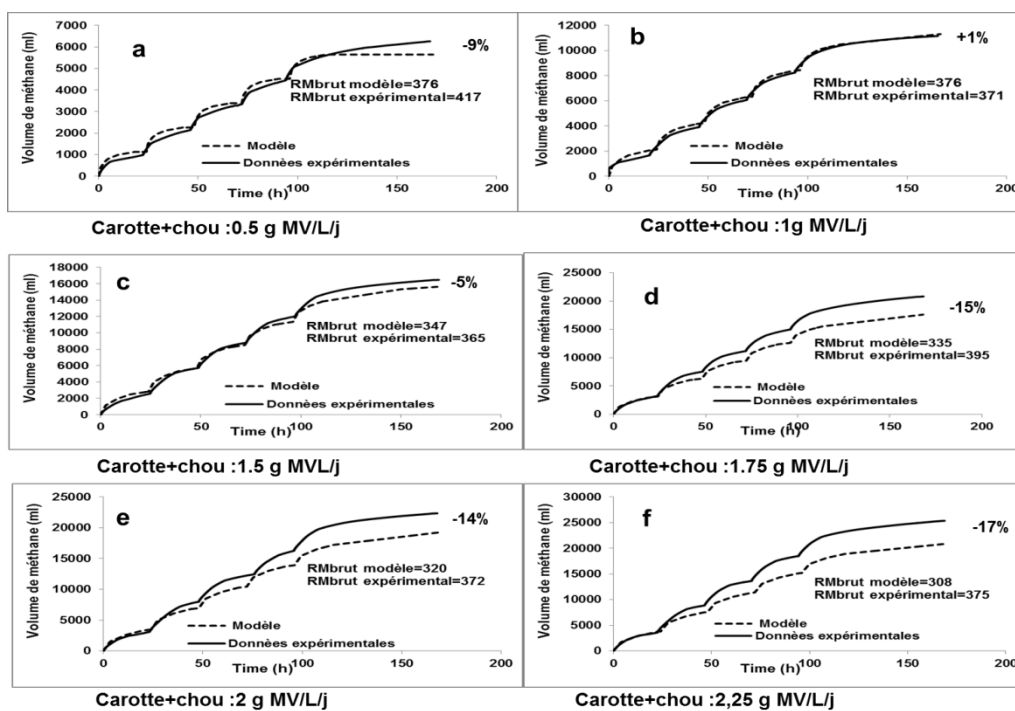


Fig. 3 : Comparaison entre les données expérimentales brutes et les données modélisées pour le mélange carotte + chou à des charges appliquées croissantes.

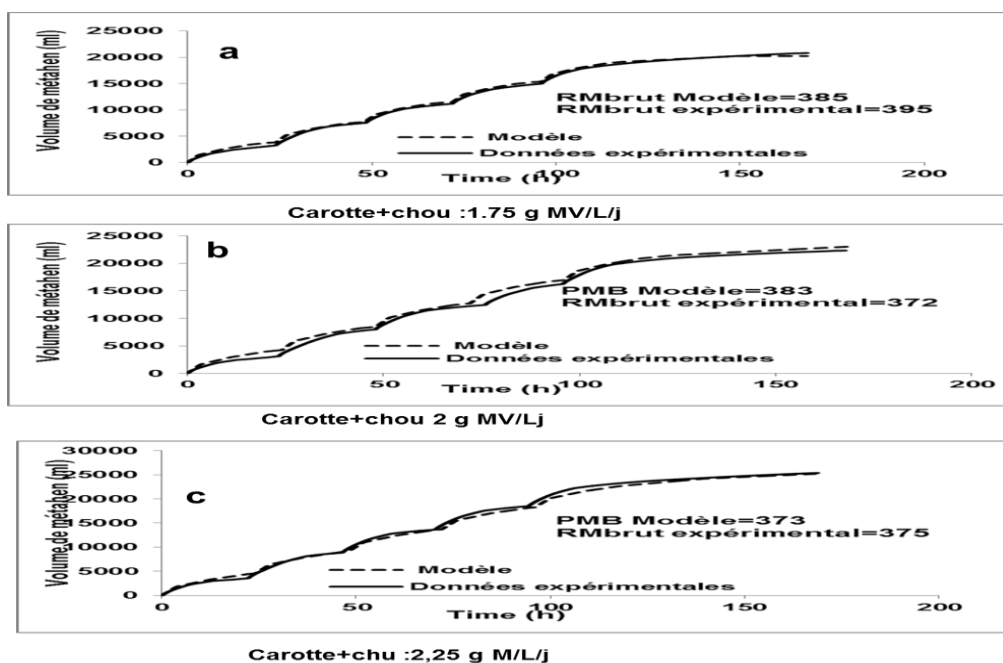


Fig. 4 : Comparaison entre les données expérimentales et les données modélisées pour le mélange carotte + chou après augmentant des k_3 : a) 1,75 MV/L/j, b) 2g MV/L/j et c) 2.25g MV/L/j.