

ANALYSE, COMMANDE ET CONTRÔLE SUPERVISE PAR LOGIQUE FLOU D'UN PROCÉDÉ BIOLOGIQUE DE DÉPOLLUTION, LA DIGESTION ANAÉROBIE

E. Rafanjanirina^{*(1)}, A. Razanaparany⁽¹⁾, Z. Randriamanantany⁽¹⁾ et E. Ceangă⁽²⁾

⁽¹⁾ Département de Physique, Faculté des Sciences, Université d'Antananarivo,
Ambohitsaina, B.P.906, 101, Antananarivo, Madagascar

⁽²⁾ Système de contrôle automatique avancé des processus, Facultatea de Ingineria Electrica si
Electronica, Universitatea « Dunarea de Jos » din Galati
Str. Domneasca nr.111, 800008, Galati, Romania

rafanjanirina@yahoo.fr, r_ambinina@yahoo.fr, zelyran@yahoo.fr, Emil.Ceanga@ugal.ro

Ce travail présente l'analyse et la conception d'une stratégie de contrôle non linéaire du procédé de digestion anaérobie dans un digesteur infiniment mélangé. Les études statique et dynamique du processus nous ont montré les propriétés du système et ses modifications, pour différents points de fonctionnement, comme le comportement à non minimum de phase. Ainsi, les techniques classiques de contrôle ne suffisent plus, alors nous devrions recourir à des lois de commande s'appuyant sur la théorie du contrôle. La conception de la stratégie de contrôle est fondée sur la technique de linéarisation entrée/sortie et la réduction de l'ordre du modèle en utilisant la méthode de perturbation singulière. Pour assurer la robustesse de commande du processus, nous déterminons la loi de commande, pour un certain nombre de points de fonctionnement, et générons la loi globale de commande, par la technique multi-modèle.

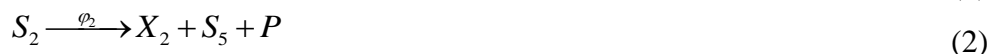
1. INTRODUCTION

Les processus de digestion anaérobie sont des systèmes complexes qui possèdent des non-linéarités très marquées et des dynamiques variables [1, 2, 3]. La commande appliquée doit aboutir à stabiliser le rendement épuratoire du procédé : pour cela nous cherchons à maintenir la concentration en acétate S_2 à l'intérieur du digesteur à une valeur de consigne.

Cet article est organisé de la manière suivante. Tout d'abord, nous représentons le modèle du procédé (§2) et la commande mise en œuvre (§3). Les performances de l'approche seront illustrées à travers quelques résultats de simulation.

2. MODELISATION

Le modèle du procédé de digestion anaérobie va nous servir comme outil de simulation dans la mise au point d'un contrôleur. Son schéma réactionnel se compose de trois étapes, à savoir, l'acidogénèse, l'acétogénèse et la méthanogénèse, peut représenter par :





avec X_1, X_2, X_3 et X_4 sont respectivement les concentrations de la population bactérienne acidogène, productrice obligée d'hydrogène, méthanogènes acétoclaste et hydrogénophile ; S_1, S_2, S_3, S_4 et S_5 sont respectivement les concentrations en substrat, glucose, acétate, propionate, hydrogène et le carbone inorganique, et P est le méthane ; φ_1 et φ_2 sont respectivement les taux de réaction acidogénèse et, φ_3 et φ_4 sont les taux de réaction méthanogénèse.

La dynamique est décrite par les équations différentielles de bilan massique [4]:

$$\frac{d\xi}{dt} = K\varphi(\xi, t) - D\xi - Q(\xi) + F \quad (5)$$

avec ξ : vecteur des variables d'état ; φ : taux de réaction ; Q : taux de flux de composant ξ ; F : débit d'alimentation ; D : taux de dilution, K : matrice dynamique du système ; Q : débit de gaz dégagé.

Les hypothèses et simplifications sont :

- le substrat entrant est unique, le glucose ;
- les secondes réactions de la phase méthanogénèse sont lentes ;
- La solubilité du méthane est extrêmement lente dans la phase liquide ;
- l'acide acétique est le seul métabolite intermédiaire considéré, c'est lui seul est le seul responsable de la production de biogaz,

L'application de la théorie des systèmes lents rapides, issue de la théorie des perturbations singulières aux deux substrats S_3 et S_4 nous permet de réduire le système, on a :



et le modèle sera d'ordre 5 se représentant comme suit :

$$\begin{cases} \frac{dX_1}{dt} = \varphi_1 - DX_1 \\ \frac{dS_1}{dt} = -k_1\varphi_1 - DS_1 + DS_{in} \\ \frac{dX_2}{dt} = \varphi_2 - DX_2 \\ \frac{dS_2}{dt} = k_3\varphi_1 - k_2\varphi_2 - DS_2 \\ \frac{dP}{dt} = k_{02}\varphi_1 + k_{04}\varphi_4 - DP - Q_1 \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{avec} \quad \varphi_1 &= \mu_1 X_1 \\ \varphi_2 &= \mu_2 X_2 \end{aligned} \quad (8)$$

où μ_1 : le taux de croissance de la bactérie acidogène, il suit l'équation de Monod et μ_2 : le taux de croissance de la bactérie méthanogène, il suit l'équation de Haldane . La production de méthane dépend de tous les autres variables d'état mais par contre, elle n'influe pas sur leur évolution. Il y a une réduction de l'ordre du modèle.

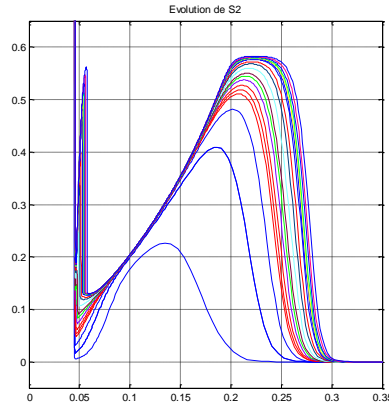


Figure 1. Variation de la teneur en acétate en fonction de taux de dilution.

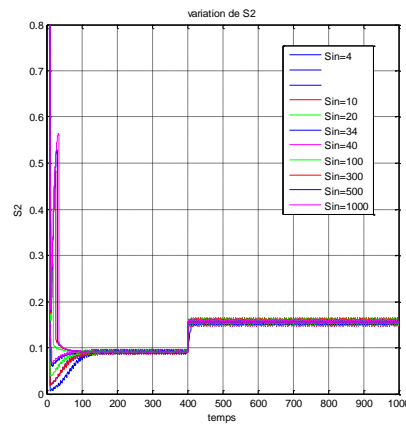


Figure 2. Evolution de la sortie S_2 avec le signal d'entrée échelon.

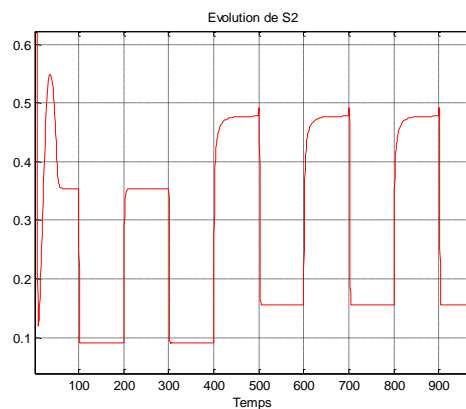


Figure 3. Evolution de la sortie en appliquant une entrée variable, Sin constante.

La variable, S_{in} , concentration en substrat polluante entrante est une perturbation pour le processus de la digestion anaérobie.

L'étude statique nous a permis de déterminer :

- le domaine de linéarité du procédé : il est plus aisé d'envisager un contrôle automatique simple du procédé sur l'évolution linéaire ascendante, dans une plage de valeurs, $0,1 < D < 0,15$ (Figure 1)
- la présence de non linéarités, le comportement à non minimum de phase (Figure 3).
- le gain statique du procédé G autour du point de fonctionnement.

Nous avons pu déterminer un modèle de comportement du procédé autour du point de fonctionnement par l'étude dynamique.

La linéarisation du modèle nous a permis de transformer une équation non-linéaire en une équation linéaire applicable autour d'un point d'opération donné, et de réaliser une étude de stabilité du contrôleur [5]. Au cours de cette étude, nous avons considéré une succession de point de fonctionnement pour lesquels nous avons montré que le système est stable.

Dans ce paragraphe, nous avons élaboré un modèle de connaissance du procédé et pu conclure aussi que le système est d'ordre trois.

2. COMMANDE MULTI-MODELE

L'objectif principal de commande est la régulation de la concentration du substrat à l'intérieur du digesteur en agissant sur le taux de dilution.

L'approche qui a été essayée est une régulation de type proportionnelle intégrale [5]. Le régulateur conçu a bien fonctionné pour un seul point de fonctionnement. Pour différents points de fonctionnement, il y a une grande différence de gain et de phase en réponse fréquentielle et une variation d'amplitude importante et un écart de temps significatif pour atteindre la valeur de la consigne pour la réponse temporelle. Alors nous allons recourir à l'approche de commande multi-modèle.

L'approche multi-modèle nous permet de décomposer le comportement dynamique du système en plusieurs zones caractérisées par des sous-modèles. En fonction de la zone où le système évolue, la sortie de chaque sous-modèle contribue plus ou moins à l'approximation du comportement global du système non linéaire. Ce dernier peut être approximé avec une précision imposée en augmentant le nombre de sous-modèles et en optimisant les fonctions de pondération.

Sur la Figure 3, est représenté, le schéma principe de l'approche. La commande est de type Sugeno-Takagi, composée par des sous-modèles partageant les mêmes vecteurs d'état (X_1, S_1, X_2, S_2, P).

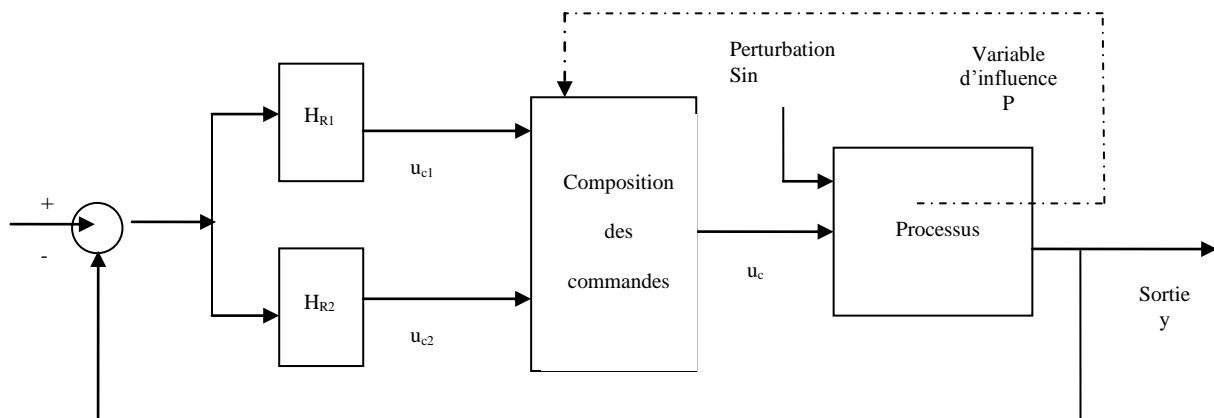


Figure 4. Schéma principe de l'approche multi-modèle.

Le débit de méthane est mesurable, alors nous pouvons l'utiliser comme observateur du système.

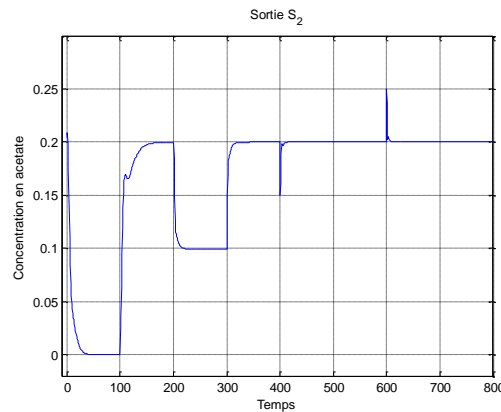


Figure 5. Variation de la sortie S_2 de la commande multi-modèle.

Sur la Figure 6, C_1 , C_2 , C_3 , C_4 , C_5 et C_6 sont des commandes définies par :

C_1 : Commande multi-modèle avec les deux sous-modèles S_5 et S_{30} ;

C_2 : Commande multi-modèle avec les deux sous-modèles S_{30} et S_{80} ;

C_3 : Commande multi-modèle avec les trois sous-modèles S_5 , S_{30} et S_{80} ;

C_4 : Commande multi-modèle avec les deux sous-modèles S_{20} et S_{300} ;

C_5 : Commande multi-modèle avec les deux sous-modèles S_{30} et S_{300} ;

C_6 : Commande multi-modèle avec les 4 sous-modèles S_5 , S_{30} , S_{80} et S_{300} .

où S_i le sous-modèle avec i la valeur de S_{in} .

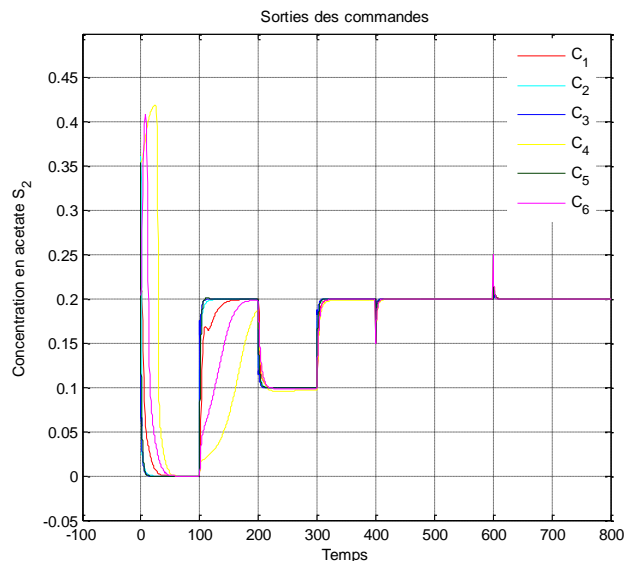


Figure 6. Evolution de sorties de différentes commandes multi-modèles

Toutes simulations numériques du modèle ont été effectuées en utilisant ses schémas-bloc SIMULINK [6].

CONCLUSION

Le contenu de ces travaux permet de montrer comment et combien l'utilisation de techniques modernes de l'approche multi-modèle peut contribuer au bon fonctionnement des procédés de traitement des déchets, et plus généralement des procédés biotechnologiques. Nous avons mis en œuvre l'algorithme de commande multi-modèle ; les résultats de simulation ont montré que cet algorithme reste relativement peu sensible aux variations de paramètres et aux perturbations (Figure 5). Le régulateur est caractérisé par le fait qu'il prend en compte des non-linéarités importantes du procédé tout en ne nécessitant des cinétiques. Les performances de la loi de commande multi-modèle ont été montrées à l'aide de simulations numériques (Figure 6).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. D. Selișteanu, Conducerea automată a bioreactorului enzimatic, Referat de Doctorat, 1999, Universitatea din Craiova.
2. S. Caraman, M. Barbu, Volumul I: Modelarea și estimarea stării și parametrilor proceselor biotehnologice In Modelarea și conducerea proceselor biotehnologice lucrări practice, 2005, Editura fundatiei universitare, Galati.
3. M. Barbu, Contribuții privind conducerea automată a proceselor biotehnologice, 2006, Universitatea din Galati.
4. G. Bastin and D. Dochain, On-line Estimation and Adaptive Control of Bioreactors, 1990, Elsevier, Amsterdam.
5. E. Ceangă, C. Nichita, L. Protin, A. Cutululis, Théorie de la commande des systèmes, 2001, Editura Tehnică, București, ISBN 973-31-2103-7.
6. M. Mokhari, M. Marie, Applications de Matlab5 et SIMULINK 2, 1999, Springer-Verlag France, ISBN 2-287-59651-8.