

Table des matières

1	Commande Prédicative Linéaire : Application au raffinage d'huiles alimentaires	
	<i>Adrian G. WILLS, William P. HEATH, Michel PERRIER</i>	3
1.1.	Introduction	3
1.2.	Problématique	4
1.3.	Modélisation du système	11
1.4.	Commande prédictive	18
1.5.	Implantation et heuristiques	28
1.6.	Conclusions	31

Chapitre 1

Commande Prédicative Linéaire : Application au raffinage d'huiles alimentaires

1.1. Introduction

Ce chapitre traite de l'application de la commande prédictive linéaire multivariable à une unité industrielle de raffinage d'huiles alimentaires. Un des principaux objectifs de commande consiste à maximiser le rendement du procédé tout en maintenant une haute qualité du produit, ce qui représente une situation typique à beaucoup de procédés industriels.

La figure 1.1 montre conceptuellement le compromis qualité-rendement et les implications de la réduction des variations des variables de sortie du procédé par l'utilisation du *feedback*.

Le chapitre est divisé en quatre sections. La section 1.2 présente le matériel de base sur le raffinage d'huiles alimentaires ainsi que des notions de séparation. Le problème de contrôle y est également décrit en détails. La section 1.3 décrit l'obtention de modèles de type boîte noire aux fins de contrôle du procédé. Ces modèles ont été obtenus à partir de techniques standard d'identification décrites ailleurs dans ce bouquin. Les détails de la technique de commande

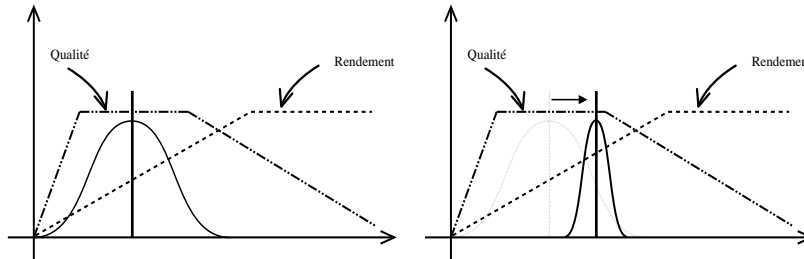


Figure 1.1. *Le compromis qualité-rendement.*

prédictive basée sur l'utilisation de fonctions barrière pour le traitement de contraintes est présenté à la section 1.4. Cette section contient également une brève discussion sur le réglage. La section 1.5 couvre quelques considérations pratiques sur l'implantation reliées au contrôleur et à l'opération d'une unité de raffinage.

1.2. Problématique

Cette section présente une brève introduction au procédé de raffinage d'huiles alimentaires (section 1.2.1) et à la théorie du fonctionnement de séparateurs (section 1.2.2), pour conduire ultimement à la formulation des objectifs de contrôle (section 1.2.3).

1.2.1. Raffinage d'huiles alimentaires

L'objectif du raffinage d'huiles alimentaires est d'enlever (ou au moins réduire à des niveaux acceptables) les impuretés dans les huiles végétales brutes ou dans le gras animal. Ces impuretés sont présentes sous diverses formes mais la préoccupation majeure est la présence d'acides gras volatils libres et des niveaux de phospholipides. Ces composants sont directement reliés à la qualité de l'huile et à sa stabilité (en termes de rancissement).

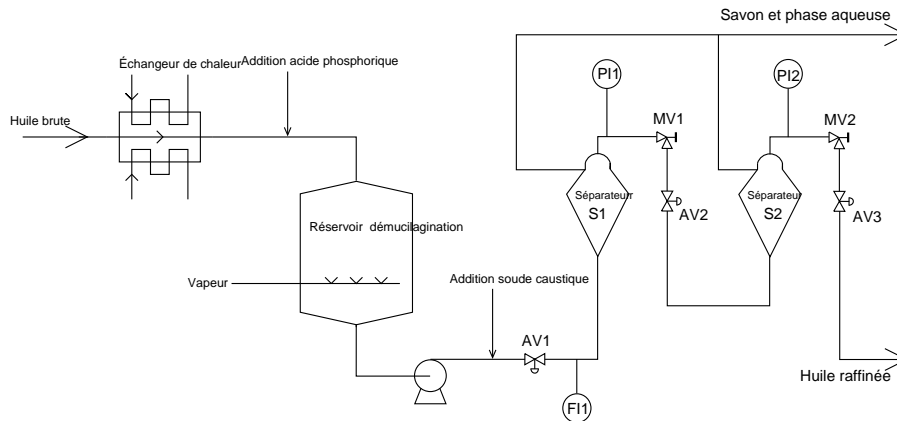


Figure 1.2. Schéma d'écoulement simplifié d'une unité de raffinage alcaline d'huile alimentaire.

Les unités typiques de raffinage traitent les huiles végétales et les gras animaux en milieu alcalin à partir d'une solution de soude caustique. La solution alcaline se combine avec les acides gras libres et forme du savon et de l'eau (voir e.g. [HUI 96] pour plus de détails). Le mélange résultant est ensuite soumis à des séparateurs pour l'enlèvement du savon et ainsi produire une *huile raffinée*, i.e. une huile de qualité acceptable en particulier avec de faibles niveaux d'acides gras libres.

La figure 1.2 présente un schéma d'écoulement simplifié de l'usine étudiée dans ce travail. Cette usine incorpore également une autre étape importante connue sous le nom de démuléination. Cette étape enlève (ou réduit) le contenu en phospholipides. Le schéma d'écoulement inclut également une autre unité de séparation. Cette unité est commune à plusieurs usines de raffinage d'huiles et consiste en un lavage à l'eau. L'eau est ajoutée entre les deux séparateurs pour enlever le savon provenant de la première étape de séparation.

Les séparateurs sont de type centrifuge à disque. La figure 1.3 montre une vue transversale d'un séparateur à disque et montre un disque avec la distribution des trous commune à chacun des disques. Ces trous sont alignés pour permettre le passage du courant d'alimentation. La figure 1.4 montre une vue conceptuelle d'un séparateur en opération.

De concert avec le personnel de l'usine, la stabilisation des séparateurs a été identifiée comme une priorité pour l'amélioration de la performance du procédé. En particulier, le débit d'entrée et la pression de la phase légère de chaque séparateur doivent être régulés pour assurer une séparation optimale du savon et de l'huile (voir figure 1.4). La section suivante présente la théorie nécessaire [ALF 90] pour bien comprendre le concept de séparation optimale.

1.2.2. *Notions théoriques sur la séparation*

Le principal objectif des séparateurs est de réduire voire enlever les impuretés contenues dans l'huile brute. Le courant d'alimentation consiste en un mélange d'huile et d'eau savonneuse. L'objectif de séparation est donc de diviser le mélange en deux courants : un courant d'huile contenant une quantité réduite en impuretés, et un courant d'eau savonneuse avec aussi peu d'huile que possible.

La loi de Stokes 1.1 être utilisée pour décrire la vitesse terminale v_g (m/s) en fonction de la taille de particule d (m), masse spécifique de particule ρ_p , masse spécifique de l'huile ρ_l (kg/m^3), la viscosité η (Pa s) et l'accélération gravitationnelle g (m/s^2).

$$v_g = \frac{d^2(\rho_p - \rho_l)}{18\eta}g \quad (1.1)$$

De façon générale, si une solution liquide est composée de deux composants primaires qui se distinguent par leur masse spécifique respective, alors un séparateur par centrifugation peut être utilisé pour séparer la solution. L'huile ayant une masse spécifique inférieure à l'eau savonneuse, le courant riche en huile est appelé phase légère et le courant d'eau est la phase dense.

La vitesse terminale v_g doit être augmentée pour atteindre de hauts taux de production. À partir de (1.1), différentes possibilités peuvent être envisagées :

1. augmenter la différence de masses spécifiques $\Delta\rho := \rho_p - \rho_l$,
2. augmenter la taille de particule d ,

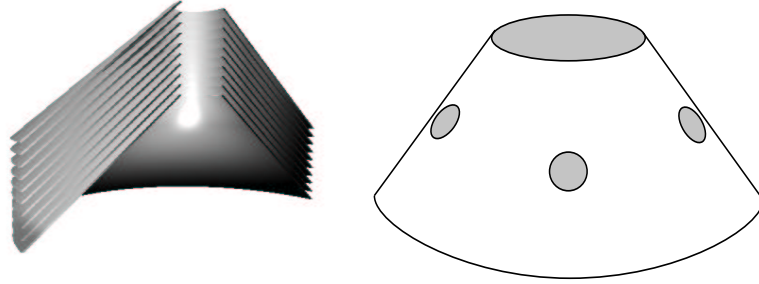


Figure 1.3. *Vue transversale d'un séparateur à disque typique.*

3. réduire la viscosité η ,
4. augmenter l'accélération gravitationnelle g .

La plupart de ces variables sont fixées pour un type d'huile donné. Toutefois, il est possible d'augmenter l'accélération gravitationnelle en utilisant l'effet centrifuge. Il est utile de regarder les pires conditions pour séparer le mélange. Supposons que d_{lim} représente le diamètre de la plus petite particule qui doit être enlevée de l'huile, $\Delta\rho_{\text{lim}}$ la différence minimum de masse spécifique et v_{glim} la vitesse minimale sous l'effet de la gravité. L'équation suivante permet de déterminer le débit volumétrique maximal Q (m^3/s) tel qu'une particule avec un diamètre supérieur à d_{lim} sera enlevée avec une vitesse v_{glim} :

$$Q = v_{\text{glim}}A \quad (1.2)$$

Cette équation montre que le débit (et ainsi le taux de production) peut être augmenté en augmentant la surface sur laquelle la force est appliquée. Ce principe constitue le principe de base d'un séparateur centrifuge à disque (figure 1.3). La capacité peut ainsi s'exprimer par :

$$\begin{aligned} Q &= \left(\frac{d_{\text{lim}}^2 \Delta\rho_{\text{lim}}}{18\eta} g \right) A_o \\ A_o &= \left(\frac{2\pi}{3g} \omega^2 N \cot \alpha (\Delta r)^3 \right) \end{aligned} \quad (1.3)$$

L'expression pour Q est simplement l'équation 1.1 reformulée. La surface effec-

tive du séparateur est donnée par A_o (m^2) où N est le nombre de disques, α l'angle des disques par rapport à l'axe de rotation et $\Delta r = r_o - r_i$; avec r_o qui dénote le rayon externe du disque et r_i le rayon interne du disque à partir de l'axe de rotation. L'équation 1.3 représente la capacité d'un séparateur sous des conditions idéales et peut ainsi être utilisée pour déterminer le débit maximal au travers du séparateur.

L'objectif est d'assurer une bonne séparation entre la phase légère et la phase dense. Tel qu'illustré à la figure 1.4, il est clair que la position optimale de l'interface entre la phase dense et la phase légère se situe près des ouvertures de distribution et qu'il faut alors contrôler le débit d'alimentation et le débit de sortie de la phase légère. La sortie de la phase dense est ouverte à l'atmosphère et ne peut être contrôlée.

L'expression reliant la pression à l'interface, p_s , la vitesse angulaire de rotation ω , la masse spécifique de la phase légère ρ_l , la masse spécifique de la phase dense ρ_h , le rayon au point de sortie de la phase légère r_l , le rayon au point de sortie de la phase dense r_h et le rayon de l'interface r_s (tel que mesuré à partir de l'axe de rotation) peut s'écrire :

$$p_s = \frac{\omega^2}{2} \rho_l (r_s^2 - r_l^2) = \frac{\omega^2}{2} \rho_h (r_h^2 - r_s^2) \quad (1.4)$$

et donc

$$\rho_l (r_s^2 - r_l^2) = \rho_h (r_h^2 - r_s^2). \quad (1.5)$$

Même si l'huile brute est filtrée avant la séparation, il demeure toujours des matières particulaires (saletés) qui s'accumulent à la périphérie changeant ainsi la dynamique de la séparation par la présence éventuelle de boues. Ce problème peut être résolu en ouvrant le séparateur pour une très courte période de temps pour laisser s'échapper les boues. On appelle cette opération le cycle d'auto-nettoyage. Même si cette perturbation est de courte durée (de l'ordre de quelques millisecondes), environ 40% du volume est perdu au cours de cette opération entraînant ainsi une grande perturbation sur la dynamique du séparateur.

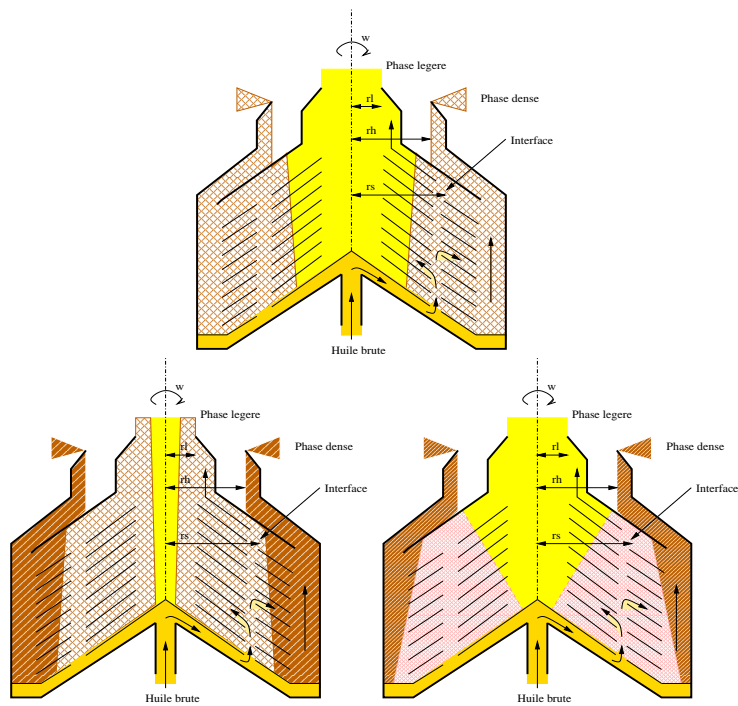


Figure 1.4. Position de l'interface dans le séparateur pour assurer une séparation optimale entre la phase dense et la phase légère. En haut : Opération sous optimale - trop de pression. En bas à gauche : Opération sous optimale - trop peu de pression. En bas à droite : opération optimale

Pour résumer donc, un mélange complexe d'huile, d'eau, de savon, et d'autres matériaux entrent au séparateur. Sous l'effet d'une différence de masse spécifique entre les deux phases et d'une force centrifuge, deux courants sont produits ; l'huile raffinée (phase légère) et l'eau savonneuse (phase dense). Pour assurer la séparation optimale entre les phases, l'interface doit être maintenue près des ouvertures de distribution à l'intérieur des disques. Les variables du procédé qui affectent la position de cette interface sont le débit d'alimentation et la pression de la phase légère. Les perturbations possibles sont les changements de l'alimentation, les changements de pression, les changements de viscosité, les changements de masse spécifique et finalement l'inévitable cycle d'auto-nettoyage.

1.2.3. Détermination des objectifs de contrôle

La qualité de l'huile raffinée est directement reliée au contenu en acides gras libres et en phospholipides de l'huile après son passage dans les séparateurs. De plus, le rendement est déterminé comme étant le rapport du produit raffiné sur le produit brut. En supposant que le comportement de toute autre variable (comme le dosage de produits chimiques, le transfert de chaleur, l'énergie de mélange, etc.) est satisfaisant, la position de l'interface joue un rôle capital dans le compromis qualité-rendement décrit au début de ce chapitre.

Toutefois, la position de cette interface n'est pas mesurée. Une possibilité pour réduire les variations de la position consiste à réduire les variations du débit d'alimentation de l'huile brute ainsi que de la pression de sortie de la phase légère.

Les principaux objectifs de contrôle peuvent donc s'énoncer de la façon suivante : réguler le débit d'alimentation au premier séparateur (S1 dans la figure 1.2) et la pression à la sortie de chaque séparateur (Figure 1.2). La figure 1.5 montre un schéma reliant les trois entrées aux trois sorties du système.

Remarque 1.1 *Les deux vannes manuelles identifiées comme MV1 et MV2 dans la figure 1.2 sont en série avec les vannes automatiques AV2 et AV3*

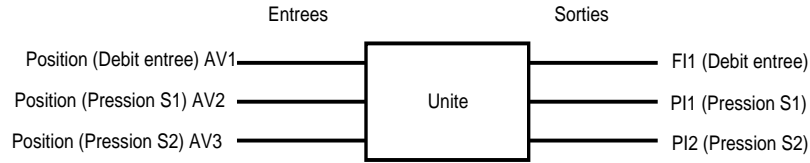


Figure 1.5. Représentation entrée-sortie pour fins de contrôle.

respectivement. Cet arrangement en série pose des défis intéressants pour la commande de ce procédé tel que discuté dans la section 1.5.2.

1.3. Modélisation du système

L'unité de raffinage est utilisée pour traiter différents types d'huiles e.g. canola, coco, tournesol et maïs. De plus, les conditions d'opération dépendent de la qualité initiale de l'huile.

Cette section décrit la modélisation entrée-sortie de dimension trois par trois de l'unité de raffinage. Le modèle est obtenu à partir de techniques d'identification. L'alternative consistant à écrire les équations fondamentales de bilan n'a pas été envisagée étant donné la complexité de l'unité, des séparateurs et du grand nombre d'huiles. Toutefois le modèle entrée-sortie résultant est consistant avec la physique du système tel que décrit plus bas. Tel que montré à la figure 1.5, les trois entrées correspondent à l'ouverture de chacune des trois vannes. Les trois sorties sont le débit d'alimentation (FI1) et la pression à la sortie de chacun des séparateurs (PI1 et PI2).

En supposant un modèle linéaire de fonctions de transfert dans le domaine discrétisé (e.g. [LJU 99]),

$$y(t) = G(q)u(t), \quad (1.6)$$

où q représente l'opérateur de décalage avant, i.e. $qy(t) = y(t+1)$ et $q^{-1}y(t) =$

$y(t-1)$. Les vecteurs y et u et la matrice G sont donnés par :

$$y(t) = \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ y_3(t) \end{bmatrix}, \quad G(q) = \begin{bmatrix} g_{11}(q) & g_{12}(q) & g_{13}(q) \\ g_{21}(q) & g_{22}(q) & g_{23}(q) \\ g_{31}(q) & g_{32}(q) & g_{33}(q) \end{bmatrix}, \quad u(t) = \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \\ u_3(t) \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

Dénotons u_1 l'ouverture de la vanne AV1, u_2 l'ouverture de de la vanne AV2 et u_3 l'ouverture de la vanne AV3. De façon similaire, y_1 représente le débit mesuré FI1, y_2 la pression mesurée PI1 et y_3 la pression mesurée PI2.

Tel que déjà mentionné, les conditions d'opération nominales changent drastiquement pour chaque type d'huile (environ seize différents types sont traités). Même pour une huile donnée, les conditions peuvent changer en fonction des propriétés de l'huile brute. Par exemple, le raffinage de l'huile de canola avec 0.5% de contenu en acides gras libres est beaucoup plus simple que le traitement d'une huile de coco avec un contenu de 3.5% d'acides gras. À cause de la nature de l'huile et de la teneur en acides gras, plus de solution alcaline est requise par exemple pour l'huile de coco que pour l'huile de canola. Ceci signifie que plus de savon est produit et que la séparation sera plus ardue et importante dans le premier cas. Cette situation résulte généralement en des débits d'alimentation plus faibles pour allonger le temps de séjour dans le séparateur et ainsi favoriser la séparation des phases. Toutefois, un comportement dynamique qualitativement similaire a été observé. En particulier, l'utilisation d'un modèle dynamique pour un type d'huile a été utilisé avec succès pour contrôler l'opération avec un autre type.

Les tests présentés ici ont été obtenus pour le traitement de l'huile de canola. Considérons un changement de l'ouverture de la vanne de débit u_1 (AV1). Évidemment, en fermant légèrement la vanne, le débit diminue de même que les pressions. Toutefois une dynamique lente a été observée reflétant ainsi le temps requis pour atteindre une nouvelle position d'équilibre de l'interface.

En utilisant une séquence binaire pseudo-aléatoire (PRBS e.g. [LJU 99]) pour perturber la position de la vanne u_1 , un modèle entrée-sortie a ensuite été identifié pour chaque sortie. (Les réponses à un échelon sur u_1 des modèles

obtenus sont montrés à la figure 1.6). La période d'échantillonnage était d'une seconde pour tous les essais.

$$g_{11}(q) = \frac{0.0070q^{-4} + 0.0035q^{-5}}{1 - 0.88q^{-1}} \quad (1.8)$$

$$g_{12}(q) = \frac{3.9q^{-2} - 2.9q^{-3} - 3.8q^{-4} + 6.2q^{-5} - 3.2q^{-6}}{1 - 1.8q^{-1} + 1.3q^{-2} - 0.49q^{-3}} \quad (1.9)$$

$$g_{13}(q) = \frac{0.29q^{-2} + 0.65q^{-3} - 0.88q^{-4}}{1 - 1.4q^{-1} + 0.46q^{-2}} \quad (1.10)$$

Une procédure similaire a été suivie pour la deuxième entrée, soit la position de la vanne AV2 (Figure 1.2). En fermant légèrement cette vanne, la pression dans le premier séparateur augmente, réduisant ainsi le débit FI1. La pression du second séparateur diminue à cause de la chute du débit. Les réponses à un échelon sur u_2 des modèles obtenus sont montrés à la figure 1.7 :

$$g_{21}(q) = \frac{0.0012q^{-3} - 0.004q^{-4}}{1 - 0.98q^{-1}} \quad (1.11)$$

$$g_{22}(q) = \frac{2.7q^{-2} - 4.7q^{-3} + 2.6q^{-4} - 0.6q^{-5}}{1 - 1.9q^{-1} + 1.4q^{-2} - 0.56q^{-3} + 0.11q^{-4}} \quad (1.12)$$

$$g_{23}(q) = \frac{-0.91q^{-2} + 0.88q^{-3}}{1 - 1.5q^{-1} + 0.54q^{-2}} \quad (1.13)$$

Enfin, la même procédure a été répétée pour la position de la vanne AV3 dans la figure 1.2. La fermeture partielle de cette vanne conduit à une augmentation de pression dans le second séparateur conduisant à une réduction du débit FI1. La pression au premier séparateur augmente également. Les ré-

ponses à un échelon sur u_3 des modèles obtenus sont montrés à la figure 1.8 :

$$g_{31}(q) = \frac{10^{-3} (-4.6q^{-8} + 9.2q^{-9} - 7.1q^{-10} + 1.4q^{-11} + 0.82q^{-12})}{1 - 1.8q^{-1} + 0.83q^{-2}} \quad (1.14)$$

$$g_{32}(q) = \frac{1.2q^{-2} - 0.86q^{-3} - 0.26q^{-4}}{1 - 1.5q^{-1} + 0.54q^{-2}} \quad (1.15)$$

$$g_{33}(q) = \frac{5.9q^{-2} - 7.4q^{-3} + 1.6q^{-4}}{1 - 1.5q^{-1} + 0.53q^{-2}} \quad (1.16)$$

On observe que des dynamiques rapides et lentes sont présentes (*c.f.* figures 1.6, 1.7 et 1.8). Le cours intervalle de temps d'échantillonnage a été choisi pour capter les dynamiques rapides.

Le modèle 3×3 de fonctions de transfert a été converti en un modèle comprenant quarante-sept variables d'état (non représenté ici).

Le modèle linéaire est valide dans une région près du point d'opération. Certains aspects de l'opération ont un impact significatif sur le comportement dynamique. Par exemple, durant le cycle d'auto-nettoyage discuté à la section 1.5.3, la dynamique du système diffère considérablement de la dynamique d'opération normale.

On pourrait tenir compte de ces aspects anormaux de l'opération en utilisant des contraintes sur les états. Seulement les contraintes sur les positions de vanne (variables d'entrée) ont été retenues pour ce travail. Une des motivations principales de l'utilisation de la commande prédictive ici consistait à opérer à des débits élevés d'alimentation près des contraintes d'ouverture des vannes. La section 1.4.4 présente des résultats détaillés d'opération près de ces contraintes.

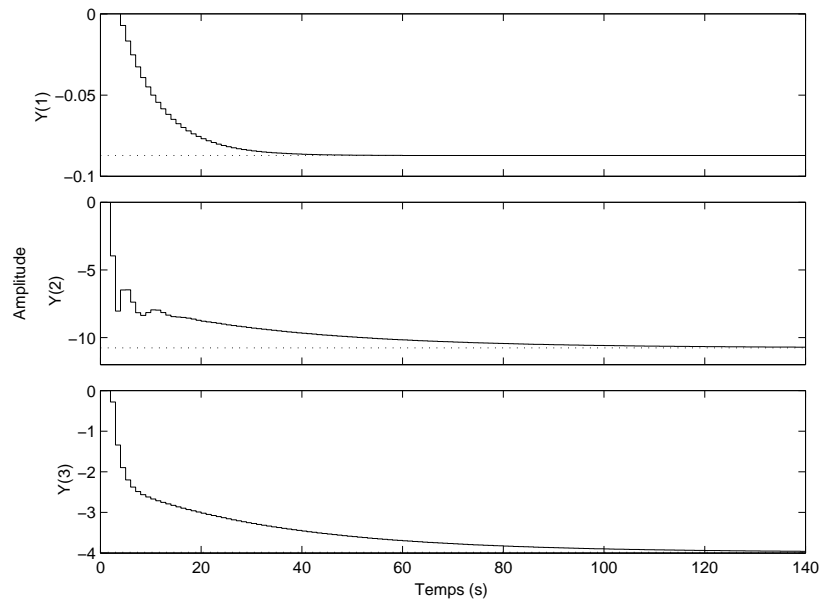


Figure 1.6. Réponses à un échelon sur u_1 .

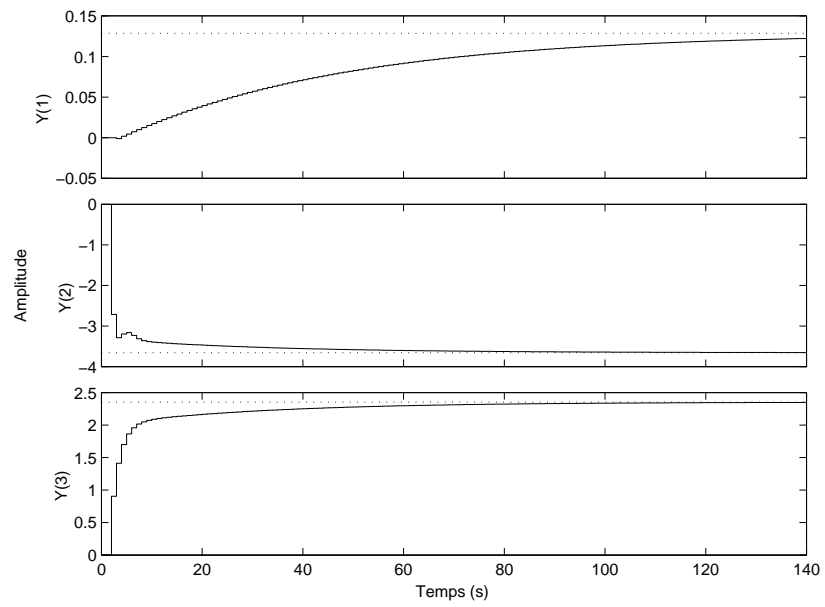


Figure 1.7. Réponses à un échelon sur u_2 .

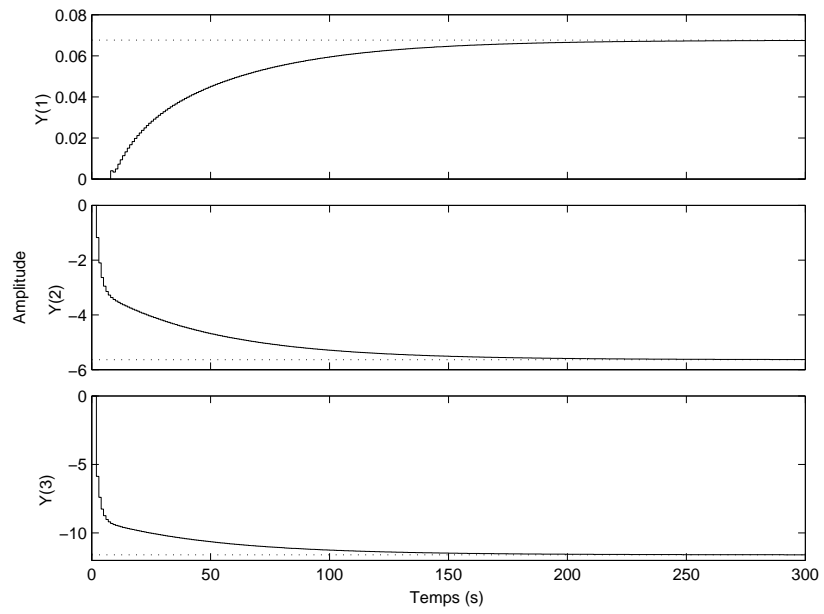


Figure 1.8. Réponses à un échelon sur u_3 .

1.4. Commande prédictive

Cette section présente l'algorithme de commande prédictive utilisé lors de nos essais. La section 1.4.1 couvre les détails de la structure du problème d'optimisation. La section 1.4.2 traite de la conception d'un filtre de Kalman pour l'estimation des perturbations sur les états et les sorties. La section 1.4.3 discute de la méthodologie de réglage utilisée. Quelques résultats expérimentaux sont présentés à la section 1.4.4. Finalement, des détails d'implantation sont discutés dans la section 1.5.

1.4.1. Structure du problème de commande prédictive

L'algorithme de commande prédictive utilisé ici est basé sur les fonctions barrières logarithmiques recentrées et est décrit en détails dans [WIL 02, WIL 03]. La structure du problème d'optimisation basée sur la formulation implicite est donnée par :

Problème 1.4.1 *Étant donné un estimé de l'état courant $\hat{x}(t)$, et des trajectoires strictement réalisables sur l'état $\mathcal{X}^r(t)$ et les entrées $\mathcal{U}^r(t)$, on résout le problème suivant :*

$$\mathcal{U}^*(t) = \arg \min_{\mathcal{U}} J(\mathcal{U}) \quad (1.17)$$

$$\text{soumis à } u_i \in \mathbb{U} \quad (1.18)$$

où la fonction coût J est définie à chaque intervalle de temps par

$$J(\mathcal{U}) = \frac{1}{2} \mathcal{U}^T W \mathcal{U} + \mathcal{U}^T f(\hat{x}(t), \mathcal{X}^r(t), \mathcal{U}^r(t)) + \mu B_{\mathcal{U}}(\mathcal{U}, \mathcal{U}^r(t)) \quad (1.19)$$

avec W et $f(\cdot)$ donnés par

$$W = \Phi^T \bar{Q} \Phi + \bar{R}, \quad f(x, \mathcal{X}^r, \mathcal{U}^r) = \Phi^T \bar{Q} [\Lambda x - \mathcal{X}^r] - \bar{R} \mathcal{U}^r, \quad (1.20)$$

1.4.2. Conception de l'observateur

Un filtre de Kalman a été conçu pour observer les perturbations des états et des sorties. La section 1.4.3 traite du réglage de cet observateur.

L'observateur a été conçu à partir du système augmenté suivant qui inclut un terme de perturbation sur la sortie :

$$x(t+1) = A_d x(t) + B_d u(t) + G w(t), \quad (1.21)$$

$$y(t) = C_d x(t) + v(t). \quad (1.22)$$

où $w(t)$ et $v(t)$ sont des séquences indépendantes de bruit blanc de moyenne nulle et A_d, B_d, C_d et G sont donnés par :

$$A_d = \begin{bmatrix} A & 0 \\ 0 & I_3 \end{bmatrix}, \quad B_d = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C_d = [C \quad I_3], \quad G = \begin{bmatrix} B & 0 \\ 0 & H \end{bmatrix}. \quad (1.23)$$

Ici I_3 réfère à une matrice identité 3×3 et H est une matrice diagonale 3×3 avec ses éléments étant des paramètres de réglage. Les matrices de covariance W et V sont aussi choisies diagonales avec également leurs éléments étant des paramètres de réglage. Si P est la solution de l'équation de Riccati du système ci-dessus, alors la matrice de gain L du filtre de Kalman est donnée par :

$$L = PC_d^T (V + C_d P C_d^T)^{-1}. \quad (1.24)$$

L'estimé de l'état courant $\hat{x}(t)$ est alors donné par :

$$\hat{x}(t) = A_d \hat{x}(t-1) + B_d u(t-1) + L \{y(t) - C_d [A_d \hat{x}(t-1) + B_d u(t-1)]\}, \quad (1.25)$$

1.4.3. Choix des paramètres de réglage

Les paramètres de réglage de l'algorithme sont choisis selon la procédure décrite ci-dessous. Nous recommandons d'utiliser μ, R, W et V comme paramètres

de réglage en ligne.

Rappelons que les objectifs de contrôle (sections 1.2.1 et 1.2.2) sont de réguler le débit d'alimentation au premier séparateur et la pression de chaque séparateur.

Le choix des paramètres de réglage (hors-ligne et en-ligne) est le suivant :

- Paramètres du contrôleur :
 - μ - pondération du terme de barrière dynamique (scalaire positif, éq. 1.19).
 - Q - matrice de pondération des états (semidéfinie positive et symétrique).
 - R - matrice de pondération des entrées (définie positive et symétrique).
 - P - matrice de pondération des états terminaux (semidéfinie positive et symétrique).
 - N - horizon de prédiction.
- Paramètres de l'observateur :
 - W - matrice de covariance du bruit des états (définie positive et symétrique).
 - V - matrice de covariance du bruit des sorties (définie positive et symétrique).
 - G - matrice de gain des états.

De façon à réduire le nombre de degrés de liberté dans les paramètres de réglage, la matrice Q a été choisie comme $Q = C^T Q_y C$, avec Q_y une matrice diagonale représentant le poids sur chacune des sorties. Le poids sur chaque sortie a été choisi de telle sorte que les déviations sur le débit soient fortement pénalisées. Il était important ici de ne pas trop faire varier le débit car le dosage de produits chimiques était ajusté manuellement et indépendamment du débit. La matrice Q_y a été choisie comme :

$$Q_y = \text{diag}(500, 1, 1). \quad (1.26)$$

La matrice R a été choisie comme une matrice diagonale avec des valeurs strictement positives. Les déviations de la position de la vanne de débit ont été plus

fortement pénalisées. La matrice R a été choisie comme :

$$R = \text{diag}(100, 10, 10). \quad (1.27)$$

La matrice P a été choisie comme la solution de l'équation discrète de Riccati avec les matrices Q et R choisies plus haut.

L'horizon de prédiction N a été choisi à $N = 25$. Ce choix se révèle un compromis entre la robustesse (inhérente à de grands horizons) et le nombre de calculs (qui croît également avec l'horizon). Des valeurs jusqu'à $N = 100$ ont été essayées mais sans amélioration comparativement à $N = 25$.

Mis à part le terme de pondération de barrière dynamique μ et la matrice R , tous les autres paramètres sont demeurés constants. En fait, l'importance de bien régler les matrices W , V et H (voir section 1.4.2 et équation (1.23) de l'observateur en particulier pour l'atténuation des perturbations est soulignée par [MAC 02].

La matrice de covariance de bruit de l'état est choisie comme :

$$W = \text{diag}(1, 5, 5, 1, 5, 5), \quad (1.28)$$

et la matrice de covariance de bruit de sortie est donnée par :

$$V = \text{diag}(0.1, 0.1, 0.1), \quad (1.29)$$

H est donnée par :

$$H = \text{diag}(0.04, 1, 1). \quad (1.30)$$

Finalement, nous avons aussi utilisé un filtre passe-bas pour chaque référence avec comme valeur de pôles discrets $\lambda_1 = 0.9$, $\lambda_2 = 0.7$ and $\lambda_3 = 0.7$.

Les valeurs de tous les paramètres de réglage ont été obtenus après de nombreux essais en-ligne et en considérant la physique du procédé. Dans la section suivante, nous présentons quelques-uns des résultats expérimentaux obtenus. Sauf lorsque mentionné expressément, les valeurs des paramètres cités plus

haut ont été utilisés.

1.4.4. *Résultats*

Cette section présente certains des résultats obtenus illustrant la performance de la commande prédictive linéaire basée sur les fonctions barrières recentrées. La figure 1.9 montre les entrées et sorties du système avec le contrôleur en fonction et hors fonction (dans ce dernier cas, le débit est contrôlé par une boucle simple). Un des objectifs était de réduire les variations autour du point d'opération (section 1.1 et figure 1.1). Pour mettre en évidence la réduction des variations, nous considérons deux cas séparés. La figure 1.10 montre les variables sans la commande prédictive. Sur la figure 1.11, le contrôleur prédictif était en fonction. L'huile traitée était la même dans chaque cas et provenait du même réservoir mais bien sûr à des temps différents.

La figure 1.12 montre la réponse du système à des changements des références des séparateurs 1 et 2. On observe un découplage des différentes sorties.

La figure 1.13 illustre le comportement du système opérant près d'une contrainte. La pression au séparateur 2 ne peut suivre le changement de référence puisque la vanne AV3 frappe la contrainte.

Les figures 1.14 et 1.15 montrent la réponse à un changement de référence sur la pression du séparateur 2. Une contrainte artificielle est imposée sur l'ouverture de la vanne AV2 pour montrer l'effet de la variation du paramètre μ . Ces figures confirment notre intuition qu'une faible pondération ($\mu = 10^{-4}$, figure 1.14) génère une commande qui se rapproche et s'éloigne brusquement de la contrainte. Une plus grande valeur du paramètre ($\mu = 1$, figure 1.15) résulte en un comportement plus lisse près de la contrainte.

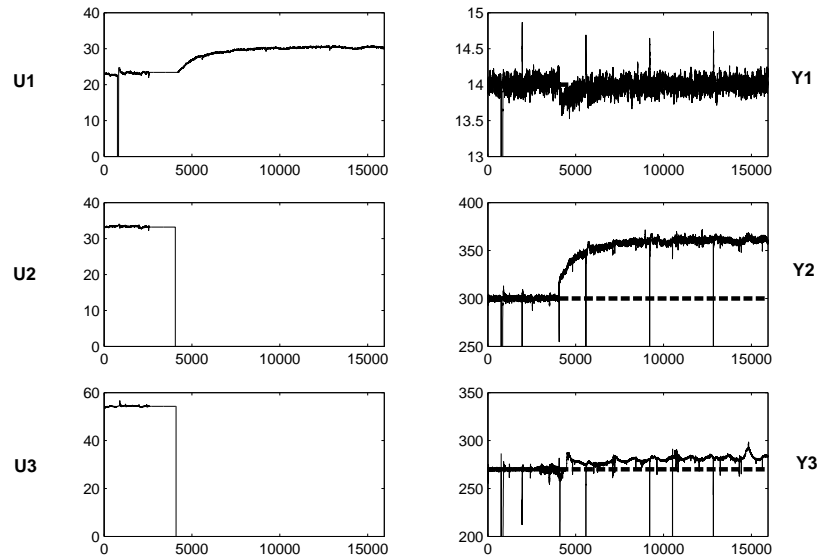


Figure 1.9. Réponse du système avec commande prédictive (entre 0 et 3000 secondes) et sans commande prédictive (entre environ 6000 et 15000 secondes).

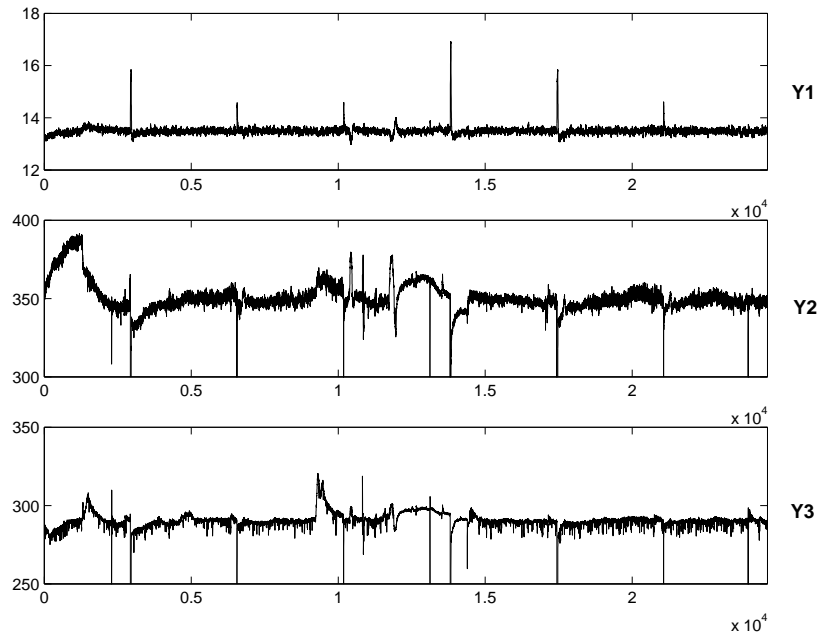


Figure 1.10. Réponse du système sur une période d'environ sept heures sans commande prédictive. Un contrôleur PI assume la régulation du débit.

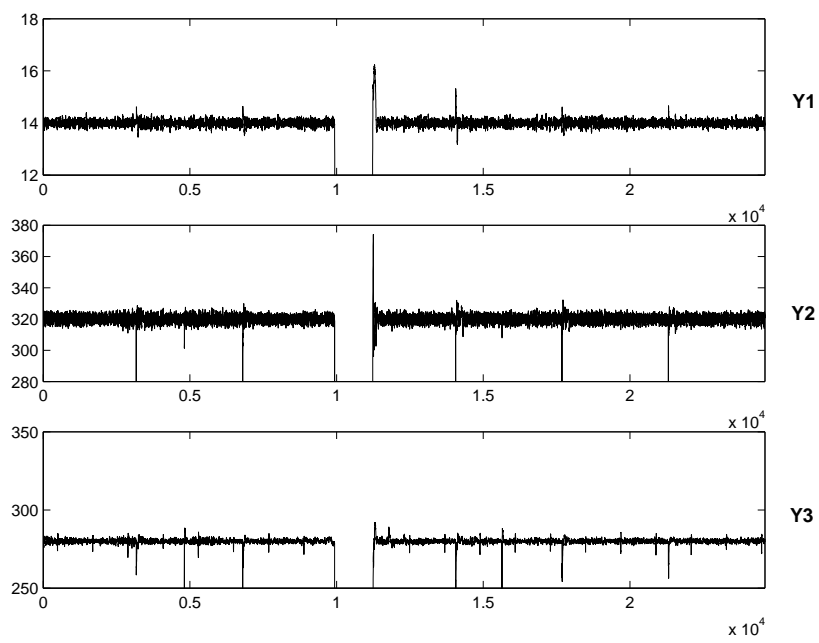


Figure 1.11. Réponse du système sur une période d'environ sept heures avec commande prédictive.

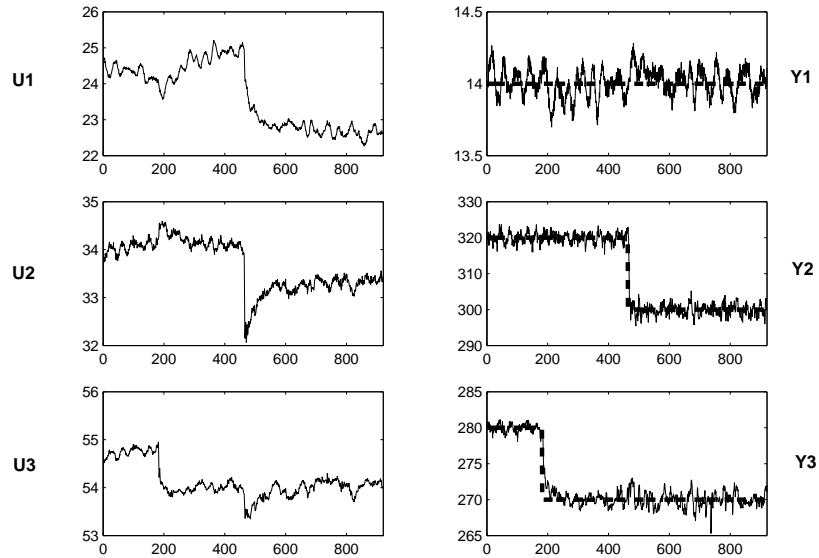


Figure 1.12. Réponse du système à des changements de référence sur le séparateur 2 (autour de 200 secondes) et au séparateur 1 (autour de 450 secondes). Les réponses sont découplées adéquatement.

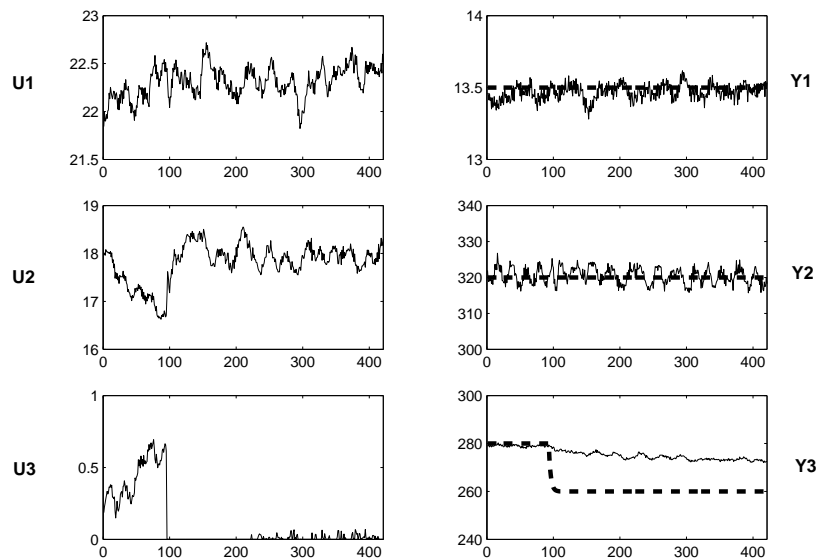


Figure 1.13. Réponse du système à un changement de référence sur le séparateur 2. La nouvelle référence ne peut être suivie car la position de la vanne AV3 est collée à une contrainte.

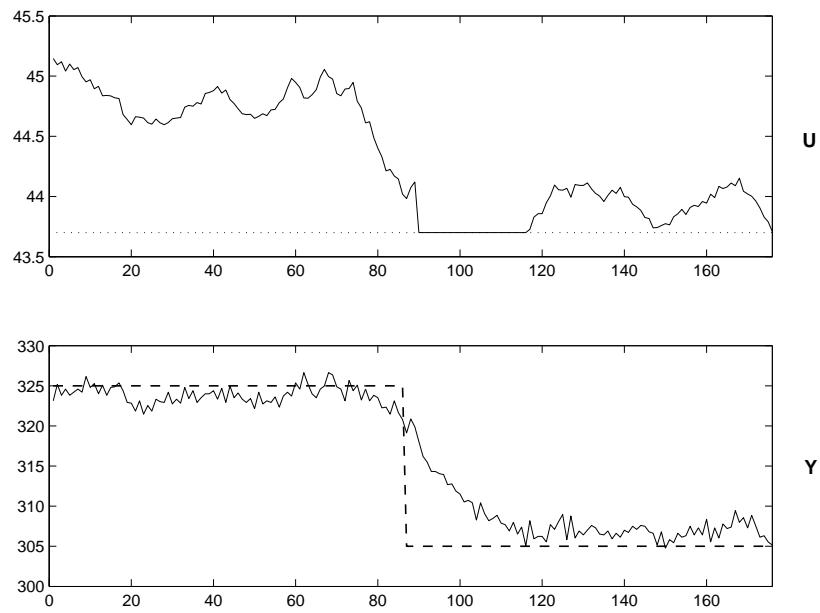


Figure 1.14. Position de la vanne AV2 et pression au séparateur 2 pour un changement de référence avec $\mu = 10^{-4}$.

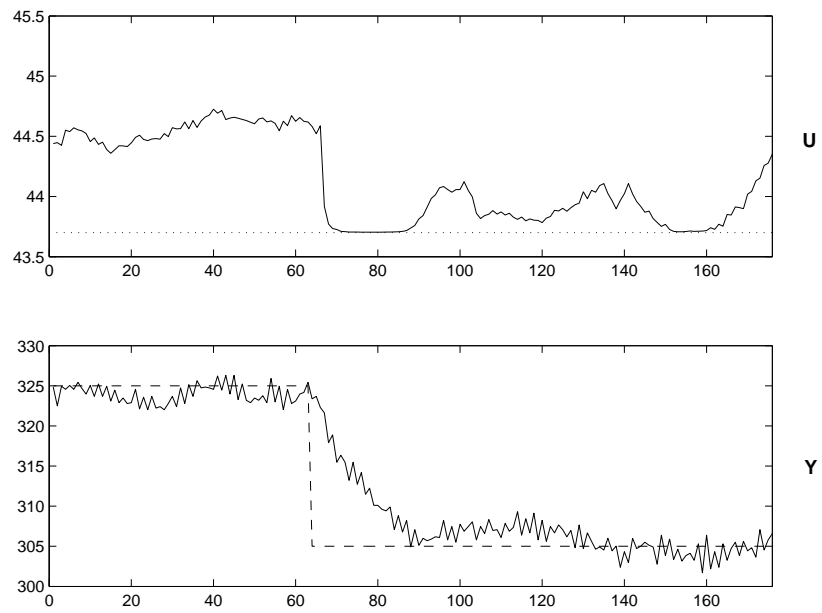


Figure 1.15. Position de la vanne AV2 et pression au séparateur 2 pour un changement de référence avec $\mu = 1$.

1.5. Implantation et heuristiques

Cette section traite de certains détails pratiques d'implantation reliés à la commande prédictive. La section 1.5.1 décrit brièvement la hiérarchie du logiciel et du matériel. La section 1.5.2 présente une stratégie pour passer du mode manuel au mode automatique, un problème qui est compliqué ici par la configuration spécifique de l'usine. Finalement, la section 1.5.3 aborde le problème du cycle *d'auto-nettoyage* et de la stratégie pour tenir compte de cette perturbation.

1.5.1. *Hiérarchie du logiciel et du matériel*

L'algorithme de commande prédictive a été codé en C++ comme un ensemble autonome de bibliothèques. Une interface à ces bibliothèques a été conçue pour le système de contrôle industriel UNAC (voir <http://www.unac.com.au/>). Ce système permet un environnement de prototypage rapide souvent souhaitable dans un environnement industriel d'implantation.

Le système d'acquisition de données procure une interface aux opérateurs pour les points de référence de débit et de pression. Un contrôleur à logique programmable sert d'interface entre les signaux des capteurs et des actionneurs.

1.5.2. *Transfert d'opération du mode manuel au mode automatique*

On a mentionné précédemment que les vannes *AV2* et *AV3* étaient en série avec les vannes *MV1* et *MV2* respectivement. Un des défis de l'implantation de cette stratégie consistait à passer du mode manuel au mode automatique. Dans le mode manuel, les vannes *AV2* et *AV3* sont maintenues complètement ouvertes et les pressions sont régulées par les vannes *MV1* et *MV2*. Le débit est régulé par une boucle PI sur la vanne *AV1*. En mode automatique, le contrôleur prédictif agit sur les vannes *AV1*, *AV2* et *AV3*.

Pour la transition du model manuel au mode automatique la procédure suivante a été utilisée : 1) passage des vannes $AV1$, $AV2$ et $AV3$ à l'algorithme de commande prédictive, 2) changement graduel et manuel de la vanne $MV1$) en position complètement ouverte, et 3) changement graduel et manuel de la vanne $MV2$ en position complètement ouverte. La figure 1.16 montre la réponse du système à cette procédure.

Cette procédure est applicable à cause de la façon inhérente de tenir compte des contraintes. On observe sur la figure 1.16 que les vannes automatiques sont maintenues à leurs contraintes respectives pendant la procédure.

1.5.3. *Cycle d'auto-nettoyage des séparateurs*

Tel que déjà mentionné, pour empêcher l'accumulation de saletés à la périphérie de chaque séparateur, un cycle d'auto-nettoyage doit être appliqué. Ce cycle est reponsable de perturbations importantes sur les débits et pressions dans le système comme on peut le constater par les pics dans les figures 1.9, 1.10 et 1.11.

Immédiatement après cette opération, le volume dans le séparateur diminue de 40 % et le débit à l'entrée augmente brusquement et la pression chute à la pression atmosphérique. Pour éviter au contrôleur de prendre des actions qui seraient de toutes façons trop lentes lorsqu'un cycle d'auto-nettoyage s'amorce, la position des vannes est maintenue constante jusqu'à ce que les débits et pressions reviennent à leur valeur normale. Ensuite le contrôleur prédictif est remis automatiquement en fonction.

De plus, nous avons observé qu'il était utile de fixer les valeurs des références aux valeurs des sorties mesurées durant le cycle. Quand les sorties mesurées sont retournées à l'intérieur d'une certaine limite, les références sont remises à leur valeur désirée et sont filtrées par les filtres passe-bas discutés à la section 1.4.3. Un exemple de la réponse du système est montré à la figure 1.17.

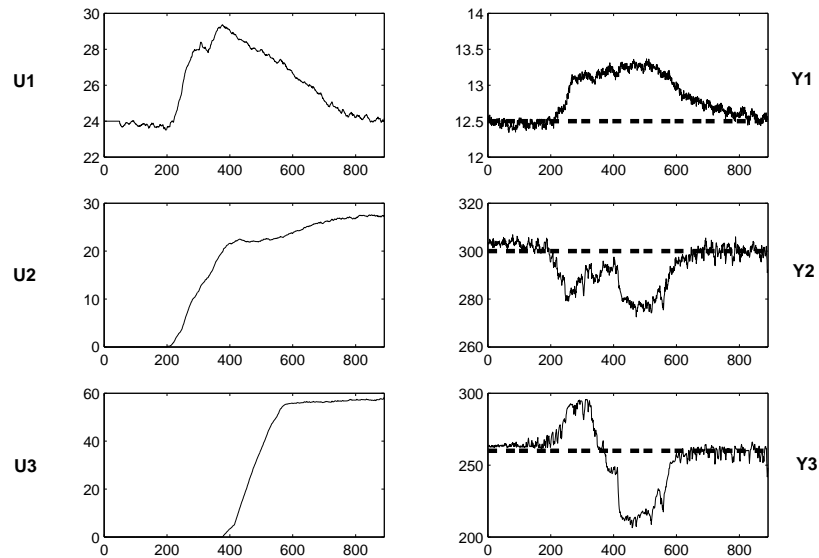


Figure 1.16. Réponse suite à la transition du mode manuel au mode automatique. Le contrôleur prédictif est mis en fonction autour de 50 secondes et après 200 secondes la position de la vanne MV1 change graduellement jusqu'à la position complètement ouverte et de même autour de 400 secondes pour la vanne MV2. Le contrôleur prédictif atténue bien l'effet de ces perturbations.

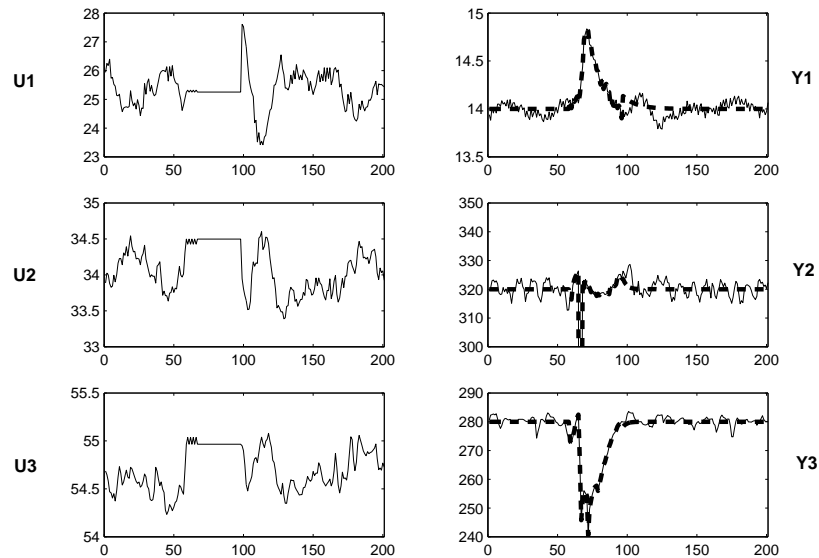


Figure 1.17. Réponse suite à un cycle d'auto-nettoyage autour de 65 secondes. Le contrôleur prédictif est réactivé autour de 100 secondes.

1.6. Conclusions

La solution à un problème multivariable de commande a été présentée dans le cadre du raffinage d'huiles alimentaires. La qualité de l'huile raffinée et le rendement de l'unité sont reliés aux conditions d'opération. En général, les exigences de qualité sont atteintes en sacrifiant le rendement. L'utilisation de la commande prédictive a permis d'obtenir de meilleurs compromis qualité-rendement.

Le réglage du contrôleur a été effectué partiellement hors-ligne et en-ligne. Les paramètres ayant le plus d'influence toutefois étaient ceux reliés à la dynamique de l'observateur. L'utilisation du nouveau paramètre de barrière μ a démontré que le contrôleur performait de façon plus prudente près des contraintes alors qu'il performe normalement loin de celles-ci, un comportement souhaitable pour un certain nombre d'applications.

Bibliographie

- [ALF 90] ALFA-LAVAL. Theory of Separation. *Alfa-Laval*, 1990.
- [HUI 96] Y.H. HUI. *Bailey's Industrial Oil & Fat Products*. John Wiley & Sons, 1996.
- [LJU 99] L. LJUNG. *System Identification : Theory for the user*. Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 1999.
- [MAC 02] J.M. MACIEJOWSKI. *Predictive Control with Constraints*. Prentice-Hall, 2002.
- [WIL 02] A.G. WILLS ET W.P. HEATH. A Recentred Barrier for Constrained Receding Horizon Control. *American Control Conference, Alaska*, 2002.
- [WIL 03] A.G. WILLS. Barrier Functions and Model Predictive Control. *Doctoral Dissertation*, The University of Newcastle, Australia, 2003.

