



Titre: Modélisation et contrôle d'un procédé multi-étagé : application industrielle au blanchiment à l'hydrosulfite

Auteur: Danielle Major

Date: 2006

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Major, D. (2006). Modélisation et contrôle d'un procédé multi-étagé : application industrielle au blanchiment à l'hydrosulfite [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/7725/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/7725/>

Directeurs de recherche: Michel Perrier, & Sylvain Gendron

Programme: Non spécifié

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

MODÉLISATION ET CONTRÔLE D'UN PROCÉDÉ MULTI-ÉTAGÉ :
APPLICATION INDUSTRIELLE AU BLANCHIMENT À L'HYDROSULFITE

DANIELLE MAJOR

DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE CHIMIQUE)

AVRIL 2006



Library and
Archives Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Published Heritage
Branch

Direction du
Patrimoine de l'édition

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

ISBN: 978-0-494-17956-7

Our file Notre référence

ISBN: 978-0-494-17956-7

NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.


Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

MODÉLISATION ET CONTRÔLE D'UN PROCÉDÉ MULTI-ÉTAGÉ :
APPLICATION INDUSTRIELLE AU BLANCHIMENT À L'HYDROSULFITE

présenté par : MAJOR Danielle

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. KLIVANA Danilo, Ph.D., président

M. PERRIER Michel, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. GENDRON Sylvain, Ph.D., membre et codirecteur de recherche

M. HAMELIN Jean-François, M. Sc. A., membre

REMERCIEMENTS

Je veux tout d'abord remercier le Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) et le Fond québécois de la recherche sur la nature et les technologies (FQRNT) pour leur soutien financier sous forme de bourses de maîtrise.

Je veux également remercier mon directeur, Michel Perrier, et mon codirecteur, Sylvain Gendron, pour m'avoir accepté comme étudiante et pour leur intérêt soutenu à la problématique industrielle de mon projet.

Je veux remercier Bernard Lupien chez Papier Masson Ltée pour avoir encouragé mon intérêt en contrôle de procédés et pour m'avoir référé à Michel Perrier. Je veux également le remercier de m'avoir donné la chance de travailler sur le projet de contrôle du blanchiment. Je veux aussi remercier Olivier Carrière pour les soins minutieux qu'il a accordés à la programmation de la stratégie de contrôle et pour avoir enfin réussi à faire fonctionner la sonde de blancheur. Je veux également remercier le personnel d'instrumentation et le personnel de laboratoire chez Papier Masson Ltée.

À Paprican Pointe-Claire, j'aimerais remercier David Wong et David Giampaolo qui ont accepté avec enthousiasme que j'utilise l'équipement de leur laboratoire. Je les remercie pour la formation qu'ils m'ont donnée et pour avoir mesuré la blancheur des formettes le lendemain de chacune de mes visites à Paprican.

À l'École Polytechnique, j'aimerais remercier le professeur Bala Srinivasan pour sa disponibilité et l'intérêt qu'il a accordé à mon projet, surtout en ce qui a trait à la

modélisation du procédé et à la simplification de ma stratégie de contrôle. J'aimerais remercier Olga Bogomolova pour m'avoir aidée avec la simulation de commande prédictive. Je veux remercier Antoine Berton pour m'avoir prêté son expertise en détection de pannes d'instruments. Je veux également remercier mes collègues de bureau : Moncef Chioua, Yanick Dumais et Bertrand Pigeon. Je ne pourrai jamais assez les remercier pour les deux ans de soutien et d'ambiance agréable au bureau.

Je tiens aussi à remercier mes parents, Claude et Paulette Major, et mon fiancé, Oliver Gerestein, pour m'avoir encouragée à poursuivre des études supérieures et pour leur amour et soutien tout au long de ma maîtrise.

RÉSUMÉ

Une stratégie de contrôle pour une application industrielle spécifique d'un procédé multi-étagé a été développée et implantée avec succès suite à une modélisation du procédé. L'application industrielle est le blanchiment en trois stages à l'hydrosulfite de la pâte thermomécanique destinée à la fabrication du papier journal à l'usine Papier Masson Ltée. L'objectif de contrôle est le maintien de la blancheur du papier à sa consigne en manipulant les dosages d'hydrosulfite de chaque stage. Un sous-objectif est également la minimisation de l'utilisation du stage de blanchiment moins efficace.

Grâce à des expériences en usine et en laboratoire, l'investigation du procédé a apporté une meilleure compréhension du procédé. Par exemple, les courbes statiques de blancheur en fonction de l'hydrosulfite sont essentiellement linéaires dans les régions d'opération considérées. De plus, le gain du deuxième stage est constant peu importe la blancheur du premier stage, à l'exception de la pâte provenant de copeaux ayant une blanchabilité réduite. Le gain statique de blancheur du troisième stage est faible, variable, et parfois négatif, ce qui suggère la minimisation de l'utilisation de ce stage de blanchiment malgré sa dynamique rapide qui peut corriger rapidement les variations de blancheur à la machine à papier.

Une stratégie de contrôle simple qui satisfait les objectifs de contrôle a été suggérée à partir d'une instrumentation limitée du procédé de blanchiment. Selon une simulation, la performance de la stratégie de contrôle suggérée est semblable à un algorithme complet de commande prédictive. Les résultats de l'implantation en usine suggèrent

que la stratégie de contrôle rencontre les objectifs et que les cas de surblanchiment sont minimisés. Deux ajouts à la stratégie de contrôle sont proposés : un algorithme de détection de dérive de sonde de blancheur et un algorithme d'identification du gain du procédé pour le troisième stage de blanchiment.

ABSTRACT

A control strategy for a specific industrial application of a multi-stage process was successfully implemented following the development of a process model. The industrial application is three-stage hydrosulphite brightening of thermomechanical pulp for newsprint production at Papier Masson Ltée. The main control objective is to maintain paper brightness at its setpoint with the hydrosulphite dosages in each stage as manipulated variables. Another objective is the minimization of the use of the least effective brightening stage.

A process investigation was carried out with mill and laboratory experiments, which allowed for a better understanding of the process. For example, brightness as a function of hydrosulphite is essentially linear in the mill's typical operation. Furthermore, the second stage static brightness gain is constant despite variations in first stage brightness, except for extreme cases of low-bleachability pulp. The third stage brightness gain is inferior to the brightness gain of the two first stages. It is also variable and can sometimes be negative. This suggests that the minimization of hydrosulphite use in the third stage is required, in spite of its dynamics which can quickly correct brightness disturbances at the paper machine.

A simple control strategy that meets the aforementioned objectives, while ensuring maximal use of limited instrumentation, was suggested and implemented in the mill. Simulations show that the performance of the proposed control strategy is comparable to a full model predictive control algorithm. Results of the industrial implementation

of the control strategy show that it meets its control objectives and limits instances of overbleaching. Two additional features to the control strategy are presented. A sensor drift detection algorithm is proposed, as well as a third stage gain identification algorithm.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	iv
RÉSUMÉ	vi
ABSTRACT	viii
TABLE DES MATIÈRES	x
LISTE DES FIGURES	xv
LISTE DES TABLEAUX	xviii
 CHAPITRE 1 : INTRODUCTION	 1
1.1 PROBLÉMATIQUE	1
1.2 OBJECTIFS	3
1.3 ORGANISATION DU MÉMOIRE	3
 CHAPITRE 2 : DESCRIPTION DE L'APPLICATION INDUSTRIELLE	 5
2.1 DESCRIPTION DU PROCÉDÉ	5
2.2 DESCRIPTION DU PROBLÈME DE CONTRÔLE	8
2.3 OBJECTIFS DE CONTRÔLE	10
 CHAPITRE 3 : REVUE DE LA LITTÉRATURE	 12
3.1 CONNAISSANCES DE BLANCHIMENT NÉCESSAIRES À L'ÉLABORATION D'UNE STRATÉGIE DE CONTRÔLE	12

3.1.1 Gains de blancheur	12
3.1.2 Cinétique du blanchiment	15
3.1.3 Perte de blancheur à la machine à papier	18
3.1.4 Blanchabilité de la pâte	18
3.2 STRATÉGIES DE CONTRÔLE EXISTANTES POUR LE BLANCHIMENT À L'HYDROSULFITE	20
3.3 CONCLUSIONS DE LA REVUE DE LA LITTÉRATURE	23
CHAPITRE 4 : INVESTIGATION DU PROCÉDÉ	24
4.1 ÉTAT DES CONNAISSANCES DU PROCÉDÉ	24
4.2 EFFET ADDITIF DU BLANCHIMENT EN TROIS STAGES	25
4.2.1 Plan d'expérience	26
4.2.2 Description de l'équipement utilisé	29
4.2.2.1 Premier stage : Raffineur secondaire de Papier Masson	29
4.2.2.2 Deuxième stage : pompe moyenne consistance reproduite par le mélangeur à haut cisaillement	30
4.2.2.3 Troisième stage : sortie des tours d'entreposage reproduite par un montage avec béccher	31
4.2.3 Protocole expérimental	32
4.2.3.1 Premier stage : Raffineur secondaire de Papier Masson	32

4.2.3.2 Deuxième stage : pompe moyenne consistance	
reproduite par le mélangeur à haut cisaillement	33
4.2.3.3 Troisième stage : sortie des tours d'entreposage	
reproduite par un montage avec bécber	34
4.2.4 Résultats de l'étude sur l'effet additif du blanchiment en trois	
stages	34
4.3 EFFET DE LA QUALITÉ DES COPEAUX DE BOIS SUR LE	
BLANCHIMENT EN TROIS STAGES	39
4.3.1 Protocole expérimental	39
4.3.2 Résultats de l'étude sur l'effet de la qualité des copeaux de bois .	40
4.4 FRÉQUENCE DES VARIATIONS DE BLANCHABILITÉ	44
4.4.1 Procédure d'échantillonnage en usine	46
4.4.2 Résultats de l'étude de la fréquence des variations de	
blanchabilité	48
4.5 MODÈLE DYNAMIQUE DU PROCÉDÉ	50
4.5.1 Gains statiques	50
4.5.2 Éléments dynamiques du modèle	52
4.5.3 Estimation des perturbations de blancheur à la machine à papier .	52
4.6 ESTIMATION DES PERTES D'HYDROSULFITE	54
4.7 CONCLUSIONS DE L'INVESTIGATION DU PROCÉDÉ	58

CHAPITRE 5 : DÉVELOPPEMENT D'UNE STRATÉGIE DE	
 CONTRÔLE	60
5.1 ALGORITHME PROPOSÉ	61
5.2 RÉSULTATS DE SIMULATION DE L'ALGORITHME PROPOSÉ	64
5.3 COMPARAISON AVEC UN ALGORITHME MPC OPTIMAL	67
5.3.1 Structure de l'algorithme de commande prédictive utilisée	67
5.3.2 Choix des points de consigne optimaux pour chaque stage	68
5.3.3 Résultats du MPC optimal	71
5.4 RÉSULTATS DE L'IMPLANTATION EN USINE	73
5.4.1 Exemples d'un bon et mauvais contrôle manuel	73
5.4.2 Effet du contrôle au premier stage sur la variabilité de la blancheur finale	75
5.4.3 Effet du contrôle au deuxième stage sur la variabilité de la blancheur finale	77
5.4.4 Effet de la stratégie de contrôle complète sur la variabilité de la blancheur finale	78
5.5 AJOUTS À LA STRATÉGIE DE CONTRÔLE	85
5.5.1 Premier stage : détection de dérive de sonde de blancheur	85
5.5.1.1 Algorithme proposé	86
5.5.1.2 Résultats de simulation	89
5.5.2 Troisième stage : détection de changement de signe du gain	93

5.5.2.1 Algorithme proposé	94
5.5.2.2 Résultats de simulation	96
5.6 CONCLUSIONS SUR LE DÉVELOPPEMENT D'UNE STRATÉGIE DE CONTRÔLE	100
CHAPITRE 6 : CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	102
6.1 MÉTHODOLOGIE POUR DÉVELOPPER UNE STRATÉGIE DE CONTRÔLE POUR UN PROCÉDÉ MULTI-ÉTAGÉ	102
6.2 CONTRIBUTIONS AUX CONNAISSANCES DU BLANCHIMENT À L'HYDROSULFITE	103
6.3 RÉSULTATS DE LA STRATÉGIE DE CONTRÔLE	104
6.4 RECOMMANDATIONS	104
RÉFÉRENCES	106

LISTE DES FIGURES

1.1 Courbe statique généralisée de la blancheur de la pâte en fonction de la concentration de l'agent de blanchiment	1
2.1 Représentation simplifiée du procédé de pâte thermomécanique avec l'emplacement des trois stages de blanchiment	2
2.2 Exemple de la blancheur du papier et des dosages d'hydrosulfite en contrôle manuel	10
4.1 « High shear mixer » de Paprican, a) fermé, b) ouvert avec de la pâte thermomécanique à 9.5%	30
4.2 Montage avec bécher de Paprican, a) immergé dans le bain d'eau avec l'agitateur et la ligne d'azote, b) sorti du bain d'eau avec de la pâte thermomécanique à 3.5%	31
4.3 Blancheur en fonction de l'hydrosulfite pour les copeaux frais	37
4.4 Blancheur en fonction de l'hydrosulfite pour les vieux copeaux	42
4.5 Comparaison des expériences avec les copeaux frais et les vieux copeaux pour le premier et deuxième stage	43
4.6 Variations de blancheur du premier stage pour un dosage d'hydrosulfite au premier stage constant	45

4.7 Gain de blancheur du 2 ^e stage en fonction de l'utilisation d'hydrosulfite au 1 ^{er} stage	49
4.8 Différence entre la blancheur du papier mesurée en usine et la blancheur du papier prédite par le modèle	54
4.9 Exemple de l'hydrosulfite associé à une perte de blancheur tolérée pour l'estimation du gaspillage d'hydrosulfite	56
4.10 Gaspillage d'hydrosulfite cumulatif estimé	58
5.1 Structure de la stratégie de contrôle proposée	61
5.2 Résultats de simulation de la stratégie de contrôleur proposée	66
5.3 Résultats de simulation de la stratégie de contrôle proposée comparée à la commande prédictive	71
5.4 Exemple d'un bon contrôle manuel	72
5.5 Exemple d'un mauvais contrôle manuel	75
5.6 Exemple où seulement la blancheur du premier stage est contrôlée	76
5.7 Transition à la manipulation de l'hydrosulfite du deuxième stage selon le contrôleur 2	77
5.8 Exemple où le contrôle du deuxième stage est en fonction (et pas le premier stage)	78

5.9 Exemple de la stratégie de contrôle complète où l'hydrosulfite du troisième stage est requis	79
5.10 Exemple de la stratégie de contrôle complète où l'hydrosulfite du troisième stage n'est pas requis, beaucoup de perturbations sur la blancheur finale	80
5.11 Exemple de la stratégie de contrôle complète où l'hydrosulfite du troisième stage n'est pas requis, peu de perturbations sur la blancheur finale	81
5.12 Comparaison de la blancheur du papier en février 2005 (sans contrôle) avec février 2006 (avec contrôle)	83
5.13 Exemple de la dérive de la sonde de blancheur du premier stage lorsque le contrôleur 1 est en fonction	86
5.14 Exemple d'une dérive de la sonde B1 à partir de 1300 minutes	90
5.15 Exemple d'aucune dérive, même tendance de B3 que dans la Figure 5.11 .	91
5.16 Exemple d'une dérive du modèle B3 à partir du temps 1300 minutes	92
5.17 Exemple d'un gain négatif au troisième stage de blanchiment	93
5.18 Gain du troisième estimé par l'algorithme MWAC sur les données de la Figure 5.14	96
5.19 Détection du changement de signe du gain du procédé	98
5.20 Détection du changement de signe du gain du procédé avec excitation	99

LISTE DES TABLEAUX

4.1 Essais requis pour la planification statistique d'expérience selon le « Central Composite Design »	27
4.2 Dosages d'hydrosulfite correspondants aux niveaux de la planification statistique d'expérience	29
4.3 Résultats des expériences de blanchiment selon la planification statistique d'expérience du Tableau 4.1	35
4.4 Résultats des expériences de blanchiment selon la planification statistique d'expérience du Tableau 4.1	40
4.5 Paramètres des blocs dans la simulation du procédé de blanchiment	52
5.1 Mesures de performance de la stratégie de contrôle proposée et de la commande prédictive	72
5.2 Mesures de performance pour l'implantation de la stratégie de contrôle	81
5.3 Comparaison de la variabilité de la blancheur et de la consommation d'hydrosulfite sans contrôle (2005) et avec contrôle (2006)	84

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

1.1 PROBLÉMATIQUE

Plusieurs procédés chimiques opèrent en stages consécutifs afin d'atteindre la qualité finale désirée tout en minimisant la quantité de produits chimiques requise. Le blanchiment de la pâte dans l'industrie papetière est un exemple d'un procédé multi-étagé. Pour un stage donné, la blancheur augmente en fonction du dosage fourni de l'agent de blanchiment. Toutefois, les dosages élevés de produits chimiques ne se traduisent pas nécessairement en augmentation proportionnelle de blancheur, puisque la blancheur maximale de ce stage aurait été atteinte. Une courbe typique du comportement statique de la blancheur en fonction du dosage du produit chimique est illustrée à la Figure 1.1 (voir par exemple Ellis 1996).

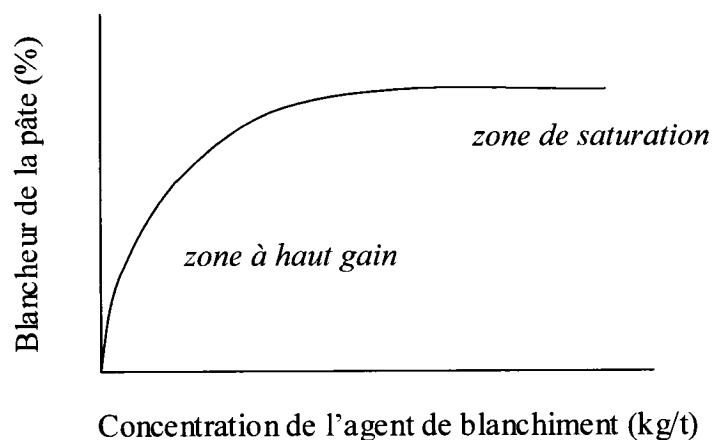


Figure 1.1 – Courbe statique généralisée de la blancheur de la pâte en fonction de la concentration de l'agent de blanchiment.

Il est donc clair que le blanchiment en plusieurs stages consécutifs -- avec un choix judicieux des consignes de blancheur -- permet une économie de produits chimiques et l'opération de chaque stage dans la zone à haut gain de la Figure 1.1. De plus, certaines conditions d'opération qui sont propres à chaque procédé de blanchiment font souvent en sorte que la blancheur maximale d'un stage donné est souvent plus élevée que la blancheur maximale du stage précédent, ce qui appuie davantage le choix de la conception d'un procédé de blanchiment en plusieurs stages.

Le blanchiment multi-étagé offre également des avantages pour la conception d'une stratégie de contrôle car de tels procédés sont souvent caractérisés par une instrumentation insuffisante entre chaque stage. Par exemple, la majorité du blanchiment peut s'effectuer dans une région du procédé qui a un grand gain de blancheur mais où il est difficile d'avoir une mesure de blancheur en continu. Un stage de blancheur additionnel mais moins efficace peut se situer dans une région du procédé en aval des autres stages où une lecture de blancheur en continu est facile à obtenir. Ce dernier stage de blancheur moins efficace peut donc servir à faire des corrections rapides pour des blancheurs légèrement insuffisantes.

Les avantages du blanchiment multi-étagé sont clairs mais il faut une bonne connaissance du procédé et une instrumentation fiable afin d'opérer chaque stage de blanchiment dans la région qui optimise l'opération entière. De plus, il est important de concevoir une stratégie de contrôle qui peut rejeter les perturbations de blancheur, sans toujours se fier à un stage de blanchiment moins efficace mais bien instrumenté.

1.2 OBJECTIFS

Les travaux présentés dans ce mémoire ont pour objectif l'élaboration d'une stratégie de contrôle pour une application industrielle spécifique d'un procédé de blanchiment multi-étagé. Cette stratégie doit être assez simple pour qu'elle soit implantée dans le système de commande distribuée (DCS) présent à l'usine et pour qu'elle soit bien comprise par les opérateurs. Pour développer une telle stratégie de contrôle, des bonnes connaissances du procédé doivent être acquises, surtout en ce qui a trait aux contraintes du procédé et aux perturbations qui doivent être rejetées par la stratégie de contrôle. L'optimisation dynamique du procédé n'est pas un objectif en soit, mais la stratégie de contrôle proposée visera à minimiser l'utilisation des stages de blanchiment moins efficaces une fois que ceux-ci seront identifiés.

La démarche effectuée pour permettre l'élaboration d'une stratégie de contrôle pour l'application industrielle peut donc servir de méthodologie générale pour le développement d'une stratégie de contrôle d'un procédé multi-étagé.

1.3 ORGANISATION DU MÉMOIRE

Le cœur du mémoire est divisé en quatre chapitres. L'application industrielle spécifique d'un procédé de blanchiment, c'est-à-dire le blanchiment à l'hydrosulfite en trois stages à l'usine de Papier Masson Ltée, est présentée au Chapitre 2. Les objectifs de contrôle pertinents à ce procédé sont également décrits au Chapitre 2. Le Chapitre 3 passe en revue la littérature qui est nécessaire au développement de la

stratégie de contrôle. Le Chapitre 4 décrit tous les essais en usine et en laboratoire qui ont permis d'obtenir une meilleure compréhension du procédé. Le Chapitre 5 énonce la stratégie de contrôle proposée ainsi que les résultats de simulation et de l'implantation en usine. Enfin, un sixième et dernier chapitre présente les conclusions et recommandations des travaux.

CHAPITRE 2 : DESCRIPTION DE L'APPLICATION INDUSTRIELLE

2.1 DESCRIPTION DU PROCÉDÉ

Le procédé multi-étagé à l'étude est le blanchiment à l'hydrosulfite de la pâte thermomécanique chez Papier Masson Ltée. Il est important de ne pas confondre le blanchiment de la pâte mécanique (« brightening »), tel que décrit dans cette application industrielle, du blanchiment de la pâte chimique (« bleaching »). Le blanchiment de la pâte mécanique conserve la lignine dans la pâte mais il produit des incréments de blancheur moindres, ce qui rend la pâte blanchie à l'hydrosulfite idéale pour le papier journal. Le blanchiment de la pâte chimique ne conserve pas la lignine et permet de produire des pâtes ayant des blancheurs beaucoup plus élevées, telles que le papier sur lequel ce mémoire est imprimé.

Contrairement à la majorité des usines de pâte thermomécanique, Papier Masson Ltée n'a qu'une seule ligne de production de pâte. Le blanchiment est effectué en trois stages consécutifs, tel qu'illustré à la Figure 2.1. La blancheur finale du papier doit être d'environ 58.8% ISO sans être inférieure à 58.3% ISO.

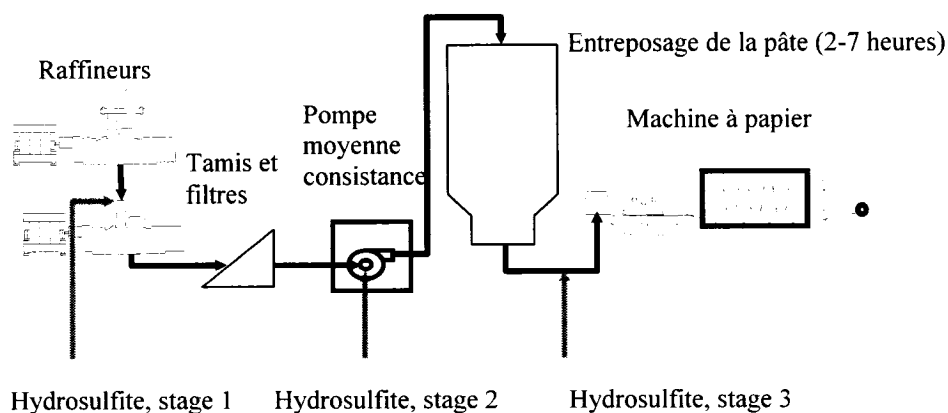


Figure 2.1 – Représentation simplifiée du procédé de pâte thermomécanique avec l'emplacement des trois stages de blanchiment.

Du point de vue du blanchiment, le procédé de pâte thermomécanique est simple. Contrairement à d'autres procédés de blanchiment, le blanchiment à l'hydrosulfite ne requiert pas de réacteurs : l'hydrosulfite peut être directement injecté dans un tuyau en autant qu'un bon mélange entre la pâte et l'hydrosulfite est possible. Vu que l'hydrosulfite est un agent réducteur, la réaction doit se produire en l'absence d'oxygène. Pour une discussion plus approfondie des conditions propices aux blanchiment à l'hydrosulfite, voir Ellis (1996).

Les copeaux de bois imprégnés de vapeur sont acheminés au raffineur primaire puis au raffineur secondaire où les copeaux sont moulus en pâte ayant une consistance (fraction massique de bois sec) d'environ 50%. Le premier stage de blanchiment est l'injection d'hydrosulfite dans le raffineur secondaire. La pâte est ensuite diluée à une consistance de 4% et agitée dans une série de réservoirs (ne sont pas illustrés dans la Figure 2.1). La pâte est ensuite nettoyée dans une série de tamis et épaissie dans des

filtres à une consistance de 9.5%. À cette consistance, la pâte nécessite une pompe spéciale pour être envoyée à l'entrée des réservoirs d'entreposage. C'est dans cette « pompe à consistance moyenne » que le deuxième stage d'hydrosulfite a lieu. La pâte est ensuite entreposée dans deux tours d'entreposage qui opèrent en parallèle avec le même niveau. Le temps de résidence dans ces deux tours est d'environ 2 à 7 heures, ce qui est la source principale du retard dans ce procédé.

Le dernier stage de blanchiment se situe à la sortie des tours d'entreposage suite à la dilution de la pâte à une consistance de 3.5%. Il ne reste plus que deux petits réservoirs de mélange avant que la pâte soit envoyée à la machine à papier. Immédiatement avant son arrivée à la machine à papier, la pâte est colorée avec des colorants bleu et rouge, transformant ainsi la pâte jaunâtre au gris qui est caractéristique du papier journal. L'addition de ces colorants est contrôlée automatiquement par rétroaction avec la mesure de couleur au bout sec de la machine et cette addition de colorants ne fait pas partie de l'étude du procédé de blanchiment du présent travail.

Au début du projet, la seule mesure de blancheur disponible était située au bout sec de la machine à papier. Une sonde de blancheur située en aval du premier stage de blancheur a été installée quelques mois après le début du projet.

2.2 DESCRIPTION DU PROBLÈME DE CONTRÔLE

Le procédé décrit à la Section 2.1 est contrôlé manuellement, comme la majorité des procédés de blanchiment à l'hydrosulfite. Le contrôle manuel du blanchiment résulte souvent en production d'un papier ayant une forte variabilité de blancheur et en une utilisation non-efficace des produits chimiques (Sopenlehto et Moilanen, 1988). En plus d'engendrer des coûts non-négligeables de produits chimiques, l'hydrosulfite injecté en excès peut causer des problèmes de corrosion dans l'équipement de l'usine et des odeurs de soufre indésirables dans le papier (Bond *et al*, 1991).

Plusieurs facteurs rendent le contrôle manuel difficile, ce qui a suscité l'intérêt pour le développement d'une stratégie de contrôle automatique. Avec une seule mesure de blancheur au bout sec de la machine à papier, il est très difficile d'ajuster manuellement les dosages dans chaque stage car aucune instrumentation permet de comprendre la contribution relative de chaque stage de blanchiment à la blancheur finale. De plus, les tours d'entreposage introduisent un retard significatif, ce qui rend plus ardue la compensation aux premier et deuxième stages lorsque des perturbations de blancheur sont perçues sur le papier. Des études faites hors du cadre de ce projet suggèrent que les tours d'entreposage ont des problèmes significatifs de court-circuitage, alors que leur design est censé donner un régime d'écoulement piston. Ceci rend l'estimation du retard presque impossible à partir des valeurs des débits de pâte et du niveau dans les tours d'entreposage.

Il y a également plusieurs perturbations qui compliquent le contrôle manuel, dont la propreté de l'eau de dilution, les variations dans la qualité des copeaux de bois, l'utilisation de pâte cassée et les changements de grade à la machine à papier. En général, les procédés de pâte thermomécanique et les machines à papier sont caractérisés par des arrêts fréquents. Le pH et la température de la pâte ont également un impact sur le blanchiment mais ceux-ci sont maintenus aux niveaux suggérés par le fournisseur d'hydrosulfite.

Les opérateurs sont avisés d'utiliser l'hydrosulfite au troisième stage seulement lorsqu'une chute dramatique de blancheur sous la limite inférieure de 58.3% fait en sorte que la blancheur du papier ne peut pas être corrigée à temps à cause du long retard entre le deuxième stage et la lecture finale. Un exemple d'une mauvaise utilisation de l'hydrosulfite au troisième stage est illustré à la Figure 2.2 : l'hydrosulfite au troisième stage est gaspillé car la blancheur du papier ne tombe jamais sous sa limite inférieure.

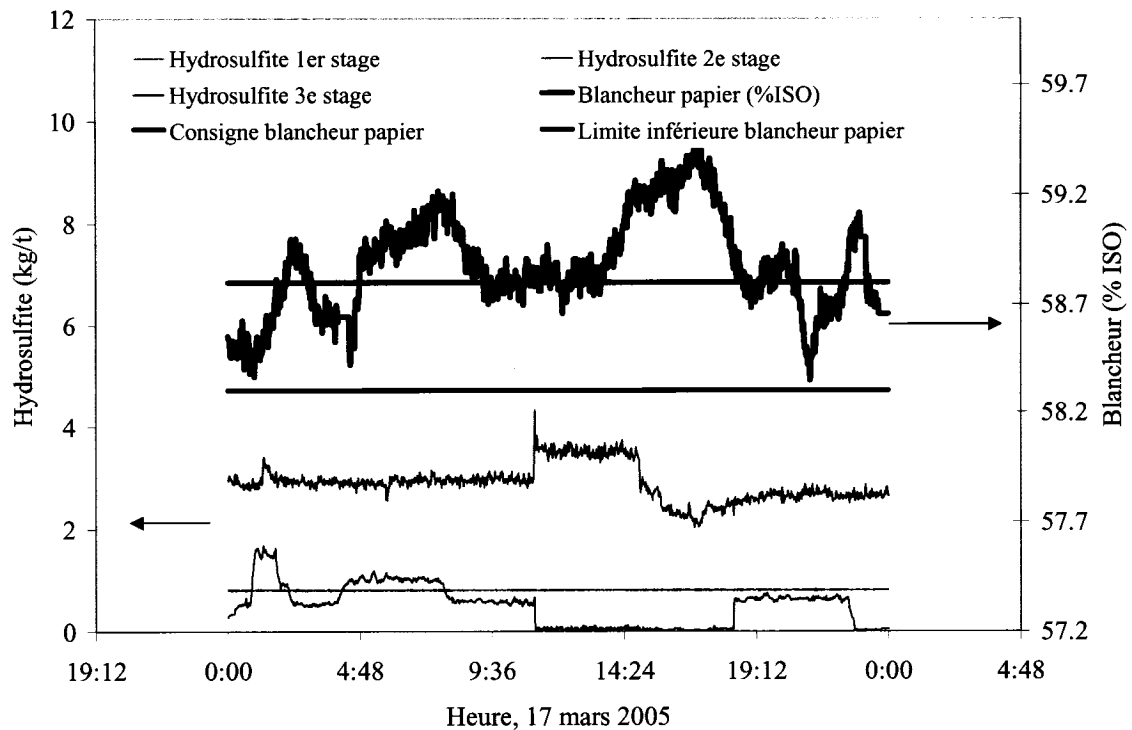


Figure 2.2 – Exemple de la blancheur du papier et des dosages d’hydrosulfite en contrôle manuel

2.3 OBJECTIFS DE CONTRÔLE

L’objectif de la stratégie de contrôle est donc le maintien de la blancheur du papier à son point de consigne avec chaque dosage d’hydrosulfite comme variables manipulées. La blancheur du papier ne doit pas tomber sous sa limite inférieure de blancheur. La stratégie de contrôle doit être assez simple pour qu’elle soit facilement implantée dans un système de commande distribué.

La stratégie de contrôle doit également viser à minimiser l’utilisation de l’hydrosulfite au troisième stage car l’expérience en usine suggère que ce stage contribue principalement aux problèmes de corrosion et d’odeurs. Cependant, le troisième stage

est celui qui est le mieux instrumenté à cause de sa proximité avec la mesure finale de blancheur à la machine à papier. En effet, plusieurs opérateurs préfèrent se fier à l'utilisation du troisième stage pour corriger rapidement les perturbations de blancheur.

Le défi principal de l'élaboration de la stratégie de contrôle est donc d'éviter l'utilisation du troisième stage même si celui-ci peut facilement permettre la production du papier qui est toujours à son point de consigne de blancheur. Pour ce faire, une meilleure compréhension du procédé est nécessaire, ce qui motive la revue de la littérature présentée au Chapitre 3 et les essais en usine et en laboratoire du Chapitre 4.

CHAPITRE 3 : REVUE DE LA LITTÉRATURE

3.1 CONNAISSANCES DE BLANCHIMENT NÉCESSAIRES À L'ÉLABORATION D'UNE STRATÉGIE DE CONTRÔLE

3.1.1 Gains de blancheur

Il est nécessaire de quantifier la contribution relative de chaque stage de blanchiment à la blancheur finale afin d'élaborer une stratégie de contrôle, surtout dans le contexte où la seule mesure de blancheur disponible est à la machine à papier. Il est donc important de déterminer les gains statiques pour chaque stage et comment ceux-ci varient avec les différentes conditions d'opération de l'usine. De plus, la non-linéarité de la courbe de blancheur pour chaque stage doit être évaluée. Avant l'élaboration de la stratégie de contrôle, l'usine tentait d'utiliser le plus d'hydrosulfite possible au deuxième stage, un peu moins au premier stage, et le moins possible au troisième stage. Les recherches dans la littérature et les essais en laboratoire et en usine serviront donc également à valider ce choix d'opération de l'usine.

L'expérience en usine suggère que les gains de blancheur sont fortement reliés à la qualité des copeaux et/ou à la blancheur initiale de la pâte qui entre dans un stage donné. La littérature reliée au blanchiment à l'hydrosulfite n'est cependant pas très claire à ce sujet. En effet, quelques articles dans la littérature du blanchiment à

l'hydrosulfite ne donnent même pas la blancheur initiale dans une courbe de blanchiment (semblable à la courbe générale de la Figure 1.1). Par exemple, Ellis (1996) et Fluet *et al* (1994) dans leurs études avec la pâte thermomécanique à une consistance de 4%, ainsi que McArthur *et al* (1988) dans son étude avec la pâte de meule (« groundwood ») à une consistance de 10%, donnent une courbe semblable à la Figure 1.1 avec un incrément de blancheur à l'ordonnée sans toutefois citer la blancheur initiale. Il est important de noter que dans la littérature du blanchiment à l'hydrosulfite, le terme « gain » n'a pas le même sens qu'en contrôle de procédé. Dans la littérature de blanchiment, le gain représente l'incrément de blancheur, c'est-à-dire la différence entre la blancheur initiale et finale causée par l'addition de l'agent de blanchiment. Dans ce mémoire, la définition traditionnelle de gain sera utilisée, c'est-à-dire l'incrément de blancheur produit par quantité d'hydrosulfite ajoutée.

Il est important de comprendre comment la blancheur initiale d'un stage quelconque affecte sa courbe de blancheur, surtout dans le contexte du blanchiment multi-étagé où la blancheur qui résulte d'un stage en amont peut être contrôlée. Certains auteurs donnent la blancheur initiale avec leurs courbes de blancheur, sans toutefois discuter des effets de celle-ci. Des exemples de ces auteurs sont Gupta et Mutton (1969) et Ingruber et Kopanidis (1967) avec leurs études effectuées sur la pâte de meule à une consistance de 3%. Cependant, Crawford (1969) dans son étude avec la pâte de meule à une consistance de 3% et Loras (1974) à une consistance de 4% stipulent que

l'incrément de blancheur qui peut être obtenu ne dépend pas de la blancheur initiale de la pâte.

Mongrain *et al* (2004) ont utilisé un capteur logiciel pour estimer la blancheur suivant l'injection d'hydrosulfite pour un procédé de pâte thermomécanique à une consistance de 8 à 10%. Ce capteur utilise une équation exponentielle, donc elle attribue un incrément de blancheur moins élevé aux dosages élevés mais avec un incrément de blancheur final qui ne dépend pas de la blancheur initiale. L'étude de Joyce et Mackie (1979), également avec de la pâte de meule 4%, démontre que l'incrément de blancheur pour un dosage donné est indépendant des variations de blancheur initiale, sauf dans le cas où la blancheur initiale serait extrêmement élevée, ce qui réduit de façon significative l'incrément de blancheur possible. Dans son étude avec la pâte thermomécanique à 4%, Loras (1976) présente les résultats qui indiquent que la pâte fabriquée à partir de copeaux qui ont beaucoup d'écorce est plus foncée que la pâte fabriquée à partir de copeaux sans écorce. De plus, la pâte avec écorce produit un incrément de blancheur inférieur à la pâte produite avec des copeaux sans écorce. Les résultats de Smedberg et Stalter (1957) montrent que le gain de blancheur diminue en fonction de la blancheur initiale mais ils n'offrent pas de discussion à ce sujet. Il y a donc plusieurs informations contradictoires au sujet de l'effet de la blancheur initiale et de la qualité des copeaux dans la littérature sur la blancheur qui peut être atteinte à un stage donné.

Deux études ont été trouvées sur le blanchiment à l'hydrosulfite multi-étagé : Munroe et Teodorescu (1990) et Ellis (1996) avec deux stages de blanchiment (équivalents aux deux premiers stages de Papier Masson Ltée). Ils soulignent qu'un incrément de blancheur plus élevé peut être obtenu lorsque le même dosage est distribué sur deux stages de blanchiment au lieu d'un seul stage. Seul Ellis présente des résultats de l'effet du dosage d'hydrosulfite du 1^{er} stage sur la courbe de blancheur du deuxième stage. Il ne discute pas de la figure où se trouvent ces résultats mais il est possible de constater que l'incrément de blancheur au deuxième stage est réduit de 30% lorsque la pâte a été blanchie au premier stage. En somme, dans une perspective de contrôle de procédé, il est important de bien comprendre l'effet des perturbations de blancheur sur chaque stage de blanchiment. Selon la littérature de blanchiment à l'hydrosulfite, il n'est donc pas évident comment se comporte le blanchiment en stages consécutifs, ce qui nécessite une planification d'expérience complète telle que démontrée au Chapitre 4.

3.1.2 Cinétique du blanchiment

La Section 3.1.1 a traité des gains statiques de blanchiment mais il est important de vérifier la cinétique de la réaction à chaque stage car elle peut introduire une dynamique qui doit être considérée dans une stratégie de contrôle.

L'hydrosulfite est couramment utilisé dans le blanchiment de la pâte destinée à la fabrication du papier journal donc il est surprenant de constater qu'il y a peu d'information sur la cinétique du blanchiment à l'hydrosulfite. Melzer (1985) a fait

plusieurs tests pour déterminer l'effet de plusieurs conditions de procédé sur la rapidité du blanchiment de la pâte de meule à une consistance de 4%. Ses résultats sont seulement donnés pour 5 minutes car, selon ses résultats, la majorité du blanchiment se fait dans la première minute. Ses résultats démontrent que la vitesse de réaction augmente en fonction du dosage d'hydrosulfite et de la consistance mais qu'elle n'est pas influencée par la vitesse d'agitation de la pâte. Vu que la réaction est si rapide, Melzer conseille d'avoir une excellente agitation lors de l'injection d'hydrosulfite pour uniformiser la blancheur de la pâte.

À l'exception de l'étude de Melzer, la cinétique du blanchiment à l'hydrosulfite est souvent présentée indirectement lors d'une discussion sur la conception d'un réservoir de mélange suivant un point d'injection, afin que le réservoir ait le temps de rétention requis. Par exemple, Crawford (1969) écrit que 75% de l'incrément de blancheur a lieu en 15 minutes et qu'un temps de rétention d'une heure est adéquat. Ces résultats attribuent au blanchiment une cinétique beaucoup plus lente que les résultats présentés dans l'étude de Melzer. Loras (1980) énonce que la plupart du blanchiment est complet en 10 à 15 minutes mais que des légères augmentations de blancheur peuvent être perçues jusqu'à 2 heures suivant l'injection. Des résultats semblables sont présentés par Becka (1973) dans son étude avec la pâte de meule à une consistance de 3% mais qu'une grande partie du blanchiment se produit très rapidement. Rapson *et al* (1965) énoncent que la plupart du blanchiment a lieu en 5 minutes et que 40 minutes sont suffisantes pour que la pâte ait rejoint sa blancheur finale dans leur étude

avec une variété de pâtes de meule à une consistance de 4%. L'étude de Tyminski (1967) stipule que la blancheur cesse d'augmenter après 15 minutes dans ses expériences avec la pâte de meule à 2.5% de consistance. Ellis (1996) montre que la plupart du blanchiment a lieu en 15 minutes et qu'une heure est suffisante. Parmi ces auteurs, seuls Crawford (1969), Rapson *et al* (1965) et Ellis (1996) donnent graphiquement la blancheur en fonction du temps.

Il n'y a pas de résultats sur la cinétique du blanchiment à des consistances égales à celles du raffineur mais cette réaction est généralement beaucoup plus rapide que les autres stages (Ellis, 1996). Pour ce qui est des conditions semblables au 2^e stage, c'est-à-dire à une consistance de 10%, Mc Arthur *et al* (1988) mentionnent que la réaction est complète en 10 minutes.

La blancheur n'est pas une quantité conservée; il n'est pas possible de faire des « bilans de blancheur » pour en déterminer une équation cinétique. Il est possible de faire des bilans sur l'hydrosulfite et de suivre l'hydrosulfite résiduel. Cependant, il est difficile de mesurer des petites quantités d'hydrosulfite résiduel avec les méthodes standards de titrage avec l'iode, ces méthodes servant surtout à déterminer la force d'une solution brute d'hydrosulfite. (Tappi T622 cm-84, 1998)

En somme, la littérature sur la cinétique du blanchiment à l'hydrosulfite n'est pas suffisamment détaillée pour qu'elle soit utile dans la conception d'une stratégie de contrôle. De plus, l'équipement nécessaire pour faire des expériences permettant d'en

déduire la cinétique du blanchiment n'ont pas été disponibles lors de cette étude. Il est donc important qu'une mesure de blancheur soit située suffisamment en aval du point d'injection d'hydrosulfite pour que seul l'effet statique du blanchiment soit perçu par l'instrument.

3.1.3 Perte de blancheur à la machine à papier

La cible de blancheur du papier est d'environ 58.8% ISO. En regardant le schéma du procédé de la Figure 2.1, il serait normal de penser que la blancheur de la pâte qui arrive au bout humide de la machine à papier doit également avoir une blancheur de 58.8% ISO. Cependant, ce n'est pas le cas car il y a une perte de blancheur lors de la formation de la feuille à la machine à papier. Cette perte de blancheur varie d'une usine à l'autre et elle est dans l'ordre de 1 à 5 points % ISO. Elle est causée par la consolidation de la toile de fibres pour former la feuille, qui résulte en une baisse de dispersion de la lumière et par conséquent de blancheur (Poirier *et al*, 1996). Dans le contexte de la conception d'une stratégie de contrôle, il est important de déterminer la blancheur que doit avoir la pâte avant de se rendre à la machine à papier.

3.1.4 Blanchabilité de la pâte

L'expérience en usine suggère que la pâte difficile à blanchir dans un stage quelconque soit également difficile à blanchir dans un stage subséquent. La blancheur d'un stage donné ne dépendrait alors pas seulement de la quantité d'hydrosulfite et de la blancheur initiale mais d'un autre paramètre relié à la qualité des copeaux, c'est-à-dire la « blanchabilité » (traduction libre du terme anglais « bleachability »). La

discussion ci-dessous ne prétend pas expliquer les causes chimiques des changements de blanchabilité. Néanmoins, dans le contexte d'une stratégie de contrôle, il est important d'avoir des façons de quantifier les changements de blanchabilité et de pouvoir mesurer ceux-ci en ligne.

La blanchabilité peut être mesurée par la quantité de produit chimique requise pour atteindre une certaine blancheur (Ragnar, 2004). Dans leur étude avec la pâte thermomécanique et le blanchiment au peroxyde d'hydrogène, Xu et Sabourin (1998) utilisent le plafond de blancheur maximale comme mesure de blanchabilité. Ils énoncent également que la blancheur de la pâte non-blanchie peut servir de mesure de blanchabilité. Brogdon *et al* (2001) proposent l'utilisation de la pente de la partie à haut gain de la courbe de blancheur comme mesure de blanchabilité lors de leurs expériences sur la pâte kraft.

La littérature sur la blanchabilité indique qu'il y a plusieurs façons de la mesurer mais elle n'indique pas si les variations de blanchabilité sont pertinentes pour le blanchiment multi-étagé. Lors de l'investigation du procédé (Chapitre 4), il sera important de déterminer si les changements de blanchabilité sont significatifs et si oui, à quelle fréquence ces changements ont lieu.

3.2 STRATÉGIES DE CONTRÔLE EXISTANTES POUR LE BLANCHIMENT À L'HYDROSULFITE

Seulement trois exemples du contrôle de blanchiment à l'hydrosulfite ont été trouvés dans la littérature. Sopenlehto et Moilanen (1988) et Gough *et al* (2002) ont développé des stratégies de contrôle pour des procédés de blanchiment à l'hydrosulfite pour un stage seulement tandis que Mongrain *et al* (2004) ont développé une stratégie pour un procédé à deux stages.

Sopenlehto et Moilanen (1988) proposent une stratégie de contrôle pour un procédé de pâte thermomécanique (consistance 3.5%) ayant un seul point d'injection d'hydrosulfite. Ce point d'injection d'hydrosulfite est situé après les tours d'entreposage, donc il est équivalent au troisième stage du procédé de Papier Masson Ltée. La consigne de blancheur finale du procédé étudié par Sopenlehto et Moilanen est très élevée (environ 73% ISO) donc la saturation de la blancheur présente un problème de contrôlabilité. Les auteurs utilisent deux instruments : une sonde de blancheur et une sonde qui mesure le résiduel d'hydrosulfite. La sonde de blancheur est située en amont de l'injection d'hydrosulfite et la sonde de résiduel d'hydrosulfite est située en aval de l'injection d'hydrosulfite. À partir de la blancheur initiale mesurée par la sonde, le dosage d'hydrosulfite nécessaire pour obtenir la cible de blancheur est calculé puis injecté dans le procédé. La quantité d'hydrosulfite injectée dans le procédé est également corrigée par la mesure du résiduel d'hydrosulfite (les détails de ces calculs ne sont pas donnés dans leur article). Cette mesure de résiduel sert à réagir directement aux perturbations dans le procédé, par exemple un

changement de pH qui pourrait soudainement changer la consommation d'hydrosulfite de la pâte. La mesure du résiduel est utile quand la consigne de blancheur est élevée car elle est plus sensible aux variations de dosages d'hydrosulfite que la blancheur, prévenant ainsi des situations de gaspillage d'hydrosulfite. Sopenlehto et Moilanen énoncent que leur stratégie a réduit la variabilité de la blancheur finale par 60% et la consommation d'hydrosulfite de 30% par rapport au contrôle manuel.

Bien que la problématique de la production de la pâte à haute blancheur ne soit pas directement pertinente au procédé de Papier Masson Ltée, l'étude du procédé effectuée par Sopenlehto et Moilanen est intéressante car elle tient en compte les perturbations causées par les variations de blancheur initiale et du procédé de mise en pâte. Papier Masson Ltée a déjà eu une sonde de résiduel d'hydrosulfite mais celle-ci ne fournissait aucune information car la lecture du résiduel suivait toujours le dosage d'hydrosulfite. Cette sonde de résiduel d'hydrosulfite ne fera pas partie de la stratégie de contrôle proposée.

Gough *et al* (2002) ont également proposé une stratégie de contrôle pour le blanchiment à l'hydrosulfite en un stage. Dans leur application industrielle, le stage d'hydrosulfite est situé à des conditions semblables au deuxième stage de Papier Masson Ltée, c'est-à-dire à la pompe moyenne consistance avec environ 3 heures de retard entre l'injection d'hydrosulfite et la lecture finale de la blancheur au bout sec de la machine à papier. Leur cible de blancheur au papier est de 58.2% ISO. Les auteurs

proposent un contrôleur prédictif-adaptatif qui utilise des sommes pondérées de fonctions de Laguerre pour estimer le retard. La variabilité de la blancheur du papier a été réduite de 83%.

Mongrain *et al* (2004) ont proposé une stratégie de contrôle par commande prédictive (« Model Predictive Control ») sur un procédé qui a deux stages de blanchiment, semblables aux deux derniers stages de blanchiment à Papier Masson Ltée. Encore, le défi est de minimiser l'utilisation du dernier stage de blanchiment tout en réduisant la variabilité de la blancheur du papier. Un capteur logiciel est utilisé pour estimer la blancheur suite à l'injection d'hydrosulfite avant les tours d'entreposage. Ce capteur logiciel utilise une mesure fournie par une sonde de blancheur située en amont de l'injection d'hydrosulfite. La blancheur du capteur logiciel est donc estimée selon la blancheur initiale mesurée et le dosage d'hydrosulfite avec une équation exponentielle qui donne une courbe semblable à la Figure 1.1. Les tests de laboratoire à chaque 6 heures permettent de réduire le biais entre la blancheur fournie par le capteur logiciel et la mesure réelle. Il est important de noter qu'à Papier Masson Ltée, la blancheur est mesurée en laboratoire seulement une fois par semaine et non 4 fois par jour.

Dans le cas de Mongrain *et al*, le retard dans les tours d'entreposage peut être estimé selon le taux de production et le niveau car les problèmes de court-circuitage sont moins importants. Les modèles utilisés dans la commande prédictive peuvent donc être mis à jour pour avoir un délai représentatif des conditions actuelles. Ils ont ajouté une zone morte à l'intérieur duquel le dernier stage d'hydrosulfite ne sera pas utilisé.

Les auteurs ont remarqué que la commande prédictive utilisait préférentiellement l'hydrosulfite au dernier stage pour maintenir la blancheur à sa consigne. Ils ont donc ajouté un optimiseur dont la fonction coût pénalise le dernier ajout d'hydrosulfite. L'utilisation d'hydrosulfite au dernier stage a été réduite, ainsi que la variabilité de la blancheur du papier.

La littérature du contrôle de procédé du blanchiment à l'hydrosulfite démontre qu'il n'y a pas eu d'études publiées sur le contrôle d'un procédé à trois stages. Même si les procédés décrits par les auteurs ci-dessus ne sont pas identiques au procédé de Papier Masson Ltée, leurs stratégies de contrôle visent à régler des problèmes qui sont pertinents au procédé de Papier Masson Ltée : longs retards, utilisation du dernier stage à éviter et risque de saturation de blancheur. Tous les auteurs déclarent que le contrôle manuel du blanchiment à l'hydrosulfite est difficile et qu'il faut une bonne instrumentation et des bonnes connaissances de procédé pour développer une stratégie de contrôle.

3.3 CONCLUSIONS DE LA REVUE DE LA LITTÉRATURE

La recherche de publications sur les gains statiques du blanchiment, la cinétique du blanchiment, et les stratégies de contrôle indique qu'il faut encore beaucoup d'information avant de proposer une stratégie de contrôle qui répond aux objectifs. En effet, cette recherche met en évidence le fait que chaque procédé de blanchiment à l'hydrosulfite est différent et qu'il est important de bien comprendre le procédé spécifique, ce qui motive l'investigation du procédé qui sera décrite au Chapitre 4.

CHAPITRE 4 : INVESTIGATION DU PROCÉDÉ

4.1 ÉTAT DES CONNAISSANCES DU PROCÉDÉ

La revue de la littérature du Chapitre 3 révèle qu'il manque l'information nécessaire afin de bien comprendre le procédé et de concevoir une stratégie de contrôle qui pourra maintenir la blancheur du papier à sa consigne tout en minimisant l'utilisation de l'hydrosulfite du troisième stage. La première étape était donc de faire le point sur les connaissances du procédé de blanchiment déjà acquises par l'usine. Il est à noter que le procédé de pâte thermomécanique à Papier Masson Ltée n'a été construit qu'en 2000.

Un an avant le début du projet de contrôle de blanchiment, les régimes d'écoulement des différents réservoirs de l'usine ont été examinés par des tests d'échelon. À part des tours d'entreposage qui ont des problèmes de court-circuitage, les autres réservoirs ont des régimes d'écoulement essentiellement parfaitement agités ou piston. Cette information sera utile dans la Section 4.5 pour le développement du modèle dynamique.

La blancheur est mesurée par le personnel de laboratoire de l'usine grâce à un échantillon de pâte hebdomadaire. Cet échantillonnage se fait à trois endroits : avant le deuxième stage, à la sortie des tours d'entreposage (juste avant le troisième stage),

et juste avant la machine à papier. Ces mesures ne fournissent rien de plus qu'un ordre de grandeur de la blancheur de la pâte à ces endroits du procédé car ces mesures sont bien en aval de chaque point d'injection d'hydrosulfite, ce qui rend difficile l'association des dosages (qui ne sont souvent pas en régime permanent) avec les mesures uniques de blancheur.

Enfin, le fournisseur d'hydrosulfite (Hydro Technologies) a fait des études pour Papier Masson Ltée pour faciliter le choix des dosages en opération manuelle. Par exemple, un rapport émis par cette entreprise suggère le meilleur dosage d'hydrosulfite au deuxième stage pour un dosage donné au premier stage. Toutefois, leurs expériences ne permettent pas de comprendre le comportement du blanchiment avec différentes combinaisons de dosages aux premier et deuxième stages, ce qui est important pour une stratégie de contrôle qui manipulera tous les dosages de tous les stages.

4.2 EFFET ADDITIF DU BLANCHIMENT EN TROIS STAGES

Les expériences en usine et en laboratoire décrites dans cette section servent à mieux comprendre le comportement additif statique du blanchiment en trois stages, plus particulièrement en ce qui a trait à la contribution relative de chaque stage de blanchiment à la blancheur finale. Il est également important de déterminer l'emplacement de la partie non-linéaire de la courbe de blanchiment de chaque stage et si celui-ci dépend du dosage d'hydrosulfite et/ou de la blancheur du stage

précédent. Ces expériences ont été effectuées lors d'une journée où l'usine était alimentée en copeaux frais.

4.2.1 Plan d'expérience

Le choix de la planification statistique d'expérience est dicté par le besoin d'exprimer la blancheur à l'alimentation de la machine à papier en fonction des dosages dans chacun des trois stages de blanchiment. Il n'est pas nécessaire d'obtenir une équation précise mais d'obtenir des ordres de grandeur représentatifs. Les trois dosages représentent les trois facteurs de la planification statistique d'expérience (Les erreurs associées à cette hypothèse de départ seront discutées dans la Section 4.2.3). Quoiqu'il y a des lacunes dans la littérature sur l'effet additif du blanchiment dans un procédé à plusieurs stages, la non-linéarité de l'effet du dosage d'hydrosulfite sur la blancheur d'un stage quelconque est bien documentée. (Ellis, 1996). *A priori*, un design d'expérience avec deux niveaux pour chaque facteur n'est donc pas suffisant. Une planification d'expérience central composite (Box et Draper, 1987) a été choisi car il peut capturer les non-linéarités pour une combinaison des trois facteurs. Tel qu'indiqué dans le Tableau 4.1, ce design d'expérience alloue cinq niveaux pour chaque facteur en 20 essais. De plus, il permet d'explorer plusieurs combinaisons de dosages, par exemple l'essai 2 où la pâte est blanchie à un niveau élevé au premier stage et à des niveaux faibles aux deux autres stages. Dans le Tableau 4.1, chaque essai représente une série de trois expériences consécutives en mode « batch » qui ont lieu sur la même pâte. Par exemple, pour l'essai 3, la pâte doit être blanchie au niveau

« -1 » dans le premier stage, cette même pâte est ensuite blanchie au niveau « +1 » dans le deuxième stage pour finalement être blanchie au niveau « -1 » dans le troisième stage. Le temps alloué au blanchiment dans chaque stage doit être assez long pour que la réaction soit complète afin de seulement évaluer les gains statiques.

Tableau 4.1 – Essais requis pour la planification statistique d'expérience selon le design central composite

Numéro de l'expérience	Nombre de répétitions	Niveau, facteur 1	Niveau, facteur 2	Niveau, facteur 3
1	1	-1	-1	-1
2	1	+1	-1	-1
3	1	-1	+1	-1
4	1	+1	+1	-1
5	1	-1	-1	+1
6	1	+1	-1	+1
7	1	-1	+1	+1
8	1	+1	+1	+1
9	1	-1.682	0	0
10	1	+1.682	0	0
11	1	0	-1.682	0
12	1	0	+1.682	0
13	1	0	0	-1.682
14	1	0	0	+1.682
15 à 20	6	0	0	0

La planification statistique d'expérience permet d'obtenir les valeurs des coefficients de l'Équation 4.1, où y_3 est la blancheur finale (c'est-à-dire la blancheur sortant du troisième stage car dans ce cas, l'effet de la perte de blancheur à la machine à papier ne sera pas reproduit en laboratoire), et u_1 , u_2 , u_3 sont les dosages d'hydrosulfite de leur stage de blanchiment respectif.

$$\begin{aligned}
 y_3 = & \beta_0 + \beta_1 u_1 + \beta_2 u_2 + \beta_3 u_3 + \beta_{12} u_1 u_2 + \beta_{13} u_1 u_3 + \beta_{23} u_2 u_3 + \dots \\
 & \dots + \beta_{123} u_1 u_2 u_3 + \beta_{11} u_1^2 + \beta_{22} u_2^2 + \beta_{33} u_3^2
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

Il est important de noter que les expériences ayant le même niveau pour le premier stage ont été faites avec la même pâte pour les deux autres stages subséquents. Par exemple, les deuxième stages des essais 1 et 3 ont été faits avec le même échantillon de pâte préalablement blanchie au premier stage au niveau « -1 ». Ceci va à l'encontre de l'hypothèse de l'indépendance de chaque expérience de la planification statistique mais il a été supposé que la variabilité des copeaux aurait eu un trop grand effet si plusieurs échantillons avaient été pris sur une longue période de temps pour le premier stage pour le même dosage. La quantité de pâte recueillie au raffineur secondaire aurait également été trop importante.

Les dosages d'hydrosulfite qui correspondent aux 5 niveaux du Tableau 4.1 sont donnés dans le Tableau 4.2. Ils ont été choisis afin de représenter une gamme typique de dosages qui sont utilisés à l'usine. Il faut remarquer que les dosages ne sont pas les mêmes pour tous les stages, vu que le deuxième stage opère normalement à des dosages plus élevés qu'aux autres stages. Il faut également remarquer que le niveau le plus bas n'est pas un dosage de zéro car, à l'exception du troisième stage, les dosages ne peuvent jamais être exactement zéro pendant des périodes prolongées car ceci nécessiterait des mesures spéciales d'entretien. Le troisième stage peut être mis à zéro dans le procédé mais il n'est pas nécessaire de l'inclure dans la planification d'expérience car les mesures de blancheur après le deuxième stage peuvent servir de mesures de blancheur à dosage zéro au troisième stage.

Tableau 4.2 – Dosages d’hydrosulfite correspondants aux niveaux de la planification statistique d’expérience

Niveau dans le Tableau 4.1	Dosages d’hydrosulfite correspondants (kg hydrosulfite actif/tonne pâte sèche)		
	1 ^{er} stage	2 ^e stage	3 ^e stage
-1.682	0.32	1.98	0.32
-1	1	3	1
0	2	4.5	2
1	3	6	3
1.682	3.68	7.02	3.68

4.2.2 Description de l’équipement utilisé

Il est impossible de faire varier tous les trois dosages d’hydrosulfite tel que prescrit par le design d’expérience à l’usine car ceci pourrait compromettre la blancheur finale du papier. De plus, l’incertitude des retards dans la tour d’entreposage suivant le deuxième stage fait en sorte qu’il serait difficile de suivre une pâte blanchie au deuxième stage jusqu’au troisième stage. Il a donc été décidé de faire les expériences de blanchiment du premier stage en usine et que les séquences de blanchiment seraient continuées en laboratoire.

4.2.2.1 Premier stage : Raffineur secondaire de Papier Masson (Sunds CD-82)

Le choix de faire le blanchiment du premier stage en usine était dicté par deux facteurs. Premièrement, il est très difficile de reproduire les conditions d’un raffineur en usine pilote. Deuxièmement, les dosages d’hydrosulfite peuvent être manipulés pour de courtes périodes de temps sans affecter le reste du procédé car un réservoir avec une constante de temps de près d’une heure est situé immédiatement en aval du

1^{er} stage de blanchiment, atténuant ainsi les perturbations de blancheur causées par les manipulations d'hydrosulfite.

4.2.2.2 Deuxième stage : pompe moyenne consistance reproduite par le mélangeur à haut cisaillement

Le blanchiment du deuxième stage a été reproduit dans le mélangeur à haut cisaillement, qui est un réacteur bâti sur mesure par Paprican. Tel que démontré dans la Figure 4.1, le mélangeur à haut cisaillement est tout simplement un bol d'acier inoxydable couvert d'isolant. L'agitateur à l'intérieur peut tourner à de très grandes vitesses (50 à 2000 rpm) et la température à l'intérieur peut être contrôlée. Paprican utilise souvent ce réacteur à 1800 rpm pour reproduire le blanchiment dans une pompe à consistance moyenne. Il a une capacité de 90 g de pâte sèche et le couvercle se ferme de façon très étanche car il est actionné par pression hydraulique. La ligne d'alimentation de droite sert à alimenter le réacteur en azote afin d'introduire le moins d'oxygène possible dans la pâte. La ligne d'alimentation de droite sert à injecter l'hydrosulfite dans la pâte.

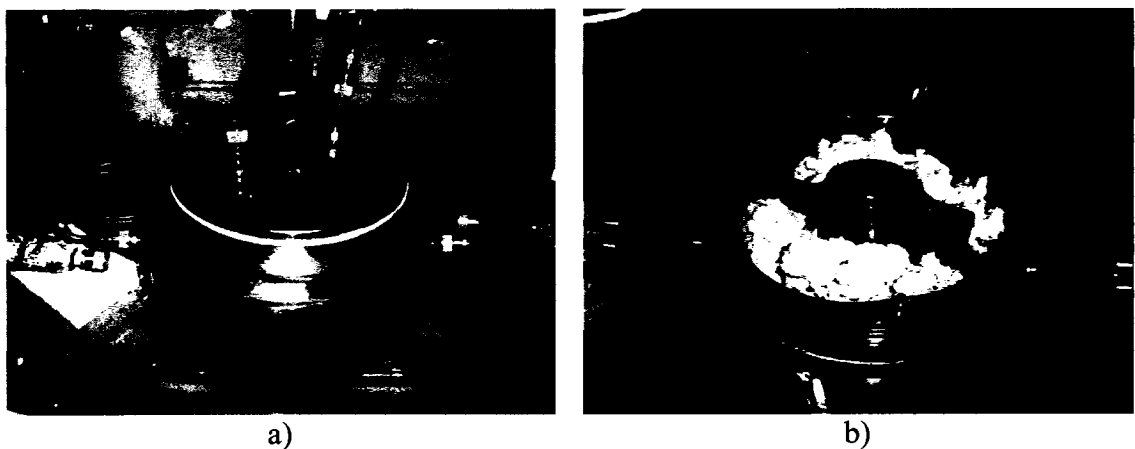


Figure 4.1 – Mélangeur à haut cisaillement de Paprican, a) fermé, b) ouvert avec de la pâte thermomécanique à 9.5%

4.2.2.3 Troisième stage : sortie des tours d'entreposage reproduite par un montage avec b cher

Le blanchiment à la sortie des tours d'entreposage a été reproduit dans un montage avec b cher   Paprican. Tel que démontré à la Figure 4.2, la pâte à une consistance de 3.5% est introduite dans un b cher. Le couvercle du b cher a une ouverture pour y introduire un agitateur et une autre ouverture pour la connexion avec la ligne d'azote comprimée. Le montage au complet est immergé dans un bain d'eau à température contrôlée.

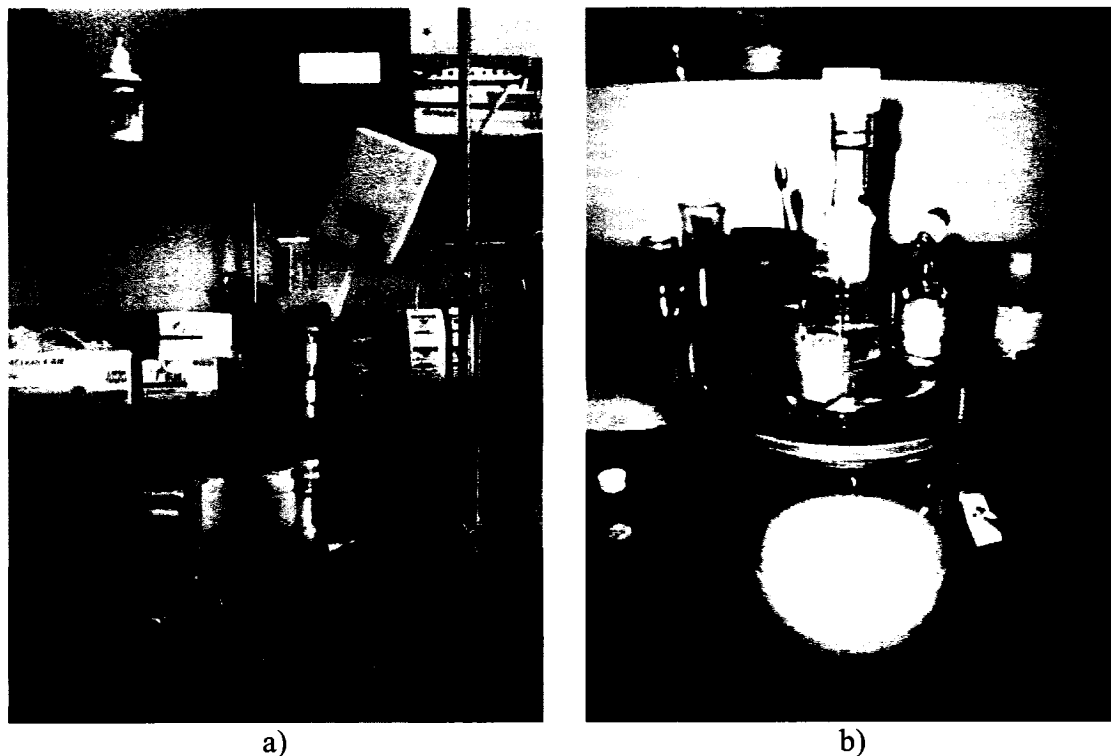


Figure 4.2 – Montage avec b cher de Paprican, a) immergé dans le bain d'eau avec l'agitateur et la ligne d'azote, b) sorti du bain d'eau avec de la pâte thermomécanique à 3.5%

4.2.3 Protocole expérimental

Chaque rangée dans la planification statistique d'expérience (Tableau 4.1) correspond à une séquence de blanchiment dans le raffineur secondaire à Papier Masson, dans le mélangeur à haut cisaillement et dans le montage avec béccher. Avec la préparation des produits chimiques et le nettoyage de l'équipement, le blanchiment en laboratoire dans les deux derniers stages prenait 3 à 4 heures. Seulement deux ou trois essais de la planification statistique d'expérience peuvent être faits par jour. Les mesures de blancheur après chaque stage peuvent seulement être prises le lendemain, une fois que les formettes de pâte étaient sèches. Même si elles ne sont pas requises dans le design d'expérience, les blancheurs après chaque stage ont été mesurées.

4.2.3.1 Premier stage : Raffineur secondaire de papier Masson

Environ 4 kg sec de pâte ont été recueillis du raffineur secondaire (Sunds CD-82) aux dosages prescrits par le design d'expérience. Tous les échantillons de pâte ont été recueillis dans une courte période de temps (5 min par dosage) afin de minimiser l'effet de la variabilité des copeaux. Le temps de séjour dans un raffineur est de l'ordre des secondes, donc il a été jugé suffisant de maintenir le dosage requis pendant 5 min avant de recueillir la pâte du raffineur. La pâte recueillie a été gardée au noir dans une chambre froide entre l'échantillonnage en usine et les expériences en laboratoire. Les mesures de blancheur ont été faites pour la pâte recueillie à chaque dosage selon la méthode ISO (Paptac, 1993). Vu que les fibres de la pâte du raffineur

secondaire sont peu développées, il fallait désintégrer la pâte dans un désintegrateur Domtar pour que la formette se tienne ensemble.

4.2.3.2 Deuxième stage : pompe moyenne consistance reproduite par le mélangeur à haut cisaillement

La procédure suivante a été suivie pour chaque expérience. Après avoir vérifié la propreté de la ligne d'injection d'hydrosulfite et la ligne d'azote, le bol du mélangeur à haut cisaillement est rempli d'eau et le couvercle est descendu avec le mécanisme hydraulique. Le bol plein d'eau est réchauffé jusqu'à 90°C à 50 rpm. Une fois le bol d'eau chauffé, l'eau est vidée et 90 g sec de pâte du premier stage (préalablement blanchie selon la planification statistique d'expérience) y est introduite après être diluée à une consistance de 9.5%. Le couvercle est redescendu. La pâte est réchauffée jusqu'à 80°C et 50 rpm et purgée d'air avec l'azote. Après 15 minutes, la quantité nécessaire d'hydrosulfite est injectée dans la pâte. Immédiatement après l'injection, la vitesse de l'agitateur est augmentée à 1800 rpm pour 4 secondes. C'est ce bref instant qui simule le passage de la pâte dans la pompe moyenne consistance. La vitesse de l'agitateur est redescendue à 50 rpm et la pâte y reste pendant une heure pour permettre la complétion de la réaction de blanchiment. Une fois l'heure écoulée, la pâte est soigneusement recueillie et diluée jusqu'à une consistance de 3.5% pour le troisième stage de blanchiment. Une quantité de la pâte qui sort du mélangeur à haut cisaillement est réservée pour la fabrication d'une formette et la mesure de blancheur.

4.2.3.3 Troisième stage : sortie des tours d'entreposage reproduite par un montage avec b cher

Pendant que le blanchiment a lieu dans le mélangeur à haut cisaillement, le bain d'eau du montage avec b cher est réchauffé à 70 C. Trente grammes de pâte sèche blanchie dans le mélangeur à haut cisaillement sont introduit dans le b cher et purgés d'azote pendant 15 minutes. L'agitateur est ensuite introduit et le montant d'hydrosulfite prescrit par la planification statistique d'expérience est ajouté à la pâte. La pâte reste ainsi pour 40 minutes puis la quantité nécessaire de pâte à la fabrication de formette est échantillonnée.

4.2.4 Résultats de l'étude sur l'effet additif du blanchiment en trois stages

Le but des expériences décrites dans la Section 4.2.2 est d'obtenir un ordre de grandeur pour le blanchiment à chaque stage. Les résultats des essais requis par la planification statistique d'expérience du Tableau 4.1 sont donnés dans le Tableau 4.3. Il est immédiatement visible que le deuxième stage a le gain de blanchiment le plus élevé et que le gain de blanchiment au troisième stage est très petit, parfois même négatif. Ces résultats justifient la politique de l'usine pour le contrôle manuel du blanchiment : favoriser le blanchiment au deuxième stage et éviter d'utiliser le blanchiment au troisième stage. Il est important de noter que le gain négatif au troisième stage n'est pas nécessairement un indicateur de l'erreur expérimentale car les inversions de blancheur peuvent avoir lieu en situation de copeaux de mauvaise

qualité ou de surblanchiment. L'inversion du gain du troisième stage peut également avoir lieu en usine, tel que discuté à la Section 5.5.2.

Tableau 4.3 – Résultats des expériences de blanchiment selon la planification statistique d'expérience du Tableau 4.1

Blancheur initiale : 57.9%

Expérience	Dosages d'hydrosulfite (kg/t)		
	suivis de blancheur (%ISO) après chaque stage		
	1 ^{er} stage	2 ^e stage	3 ^e stage
1	1	3	1
	58.4	63.7	63.9
2	3	3	1
	61.7	64.1	64.2
3	1	6	1
	58.4	65.8	65.2
4	3	6	1
	61.7	65.0	65.6
5	1	3	3
	58.4	64.3	65.5
6	3	3	3
	61.7	64.1	65.6
7	1	6	3
	58.4	65.8	66.1
8	3	6	3
	61.7	67.2	67.0
9	0.32	4.5	2
	56.6	63.8	64.3
10	3.68	4.5	2
	61.6	66.8	67.2
11	2	1.98	2
	60.9	64.2	64.9
12	2	7.02	2
	60.9	65.6	66.9
13	2	4.5	0.32
	60.9	66.5	66.1
14	2	4.5	3.68
	60.9	66.2	67.3
15	2	4.5	2
	60.9	66.0	66.81

Tableau 4.3 (suite)

16	2	4.5	2
	60.9	65.8	66.0
17	2	4.5	2
	60.9	65.5	65.2

La régression avec les données et l'Équation 4.1 (c'est-à-dire l'équation qui accompagne normalement une planification statistique de ce genre) indique que chaque stage de blanchiment a à peu près le même effet sur la blancheur finale. Or, ceci est faux car il est évident que le deuxième stage contribue le plus au blanchiment. Le choix de la planification statistique d'expérience n'était pas le bon car la blancheur après chaque stage est importante dans la blancheur que pourra atteindre le stage suivant. Il était faux de supposer que chaque dosage d'hydrosulfite est un facteur qui contribue à la blancheur finale. Il faut donc utiliser séparément les données de chaque stage pour voir l'effet du dosage d'hydrosulfite et la blancheur du stage précédent. Ceci n'aurait pas été possible si les mesures intermédiaires de blancheur n'avaient pas été prises.

Il est impossible de voir tous les résultats du Tableau 4.3 dans le même graphique car la planification statistique d'expérience décrit une surface tridimensionnelle avec les trois facteurs. Un exemple des résultats est la Figure 4.3 où les résultats des expériences 11 à 17 pour le deuxième stage et 13 à 17 pour le troisième stage sont affichés. Les résultats du premier stage sont ceux de l'échantillonnage en usine. Vu que les résultats des expériences 11 à 17 sont démontrés dans ce graphique, seuls les résultats du deuxième et troisième stage pour un dosage de 2 kg/t au premier stage

sont donnés. De la même façon, seuls les résultats du troisième stage où le deuxième stage a été blanchi à 4.5 kg/t et le premier stage à 2 kg/t sont donnés. Il y a donc une multitude de graphiques qui peuvent être donnés, tout dépendant de la surface de la planification tridimensionnelle statistique choisie.

La Figure 4.3 s'interprète donc ainsi : la pâte à 57.9% est blanchie avec 2 kg/t d'hydrosulfite à une blancheur de 60.9%, qui devient la blancheur initiale du deuxième stage. La pâte est blanchie au deuxième stage avec 4.5 kg/t d'hydrosulfite jusqu'à une blancheur de 65.7%, qui devient la blancheur initiale du troisième stage.

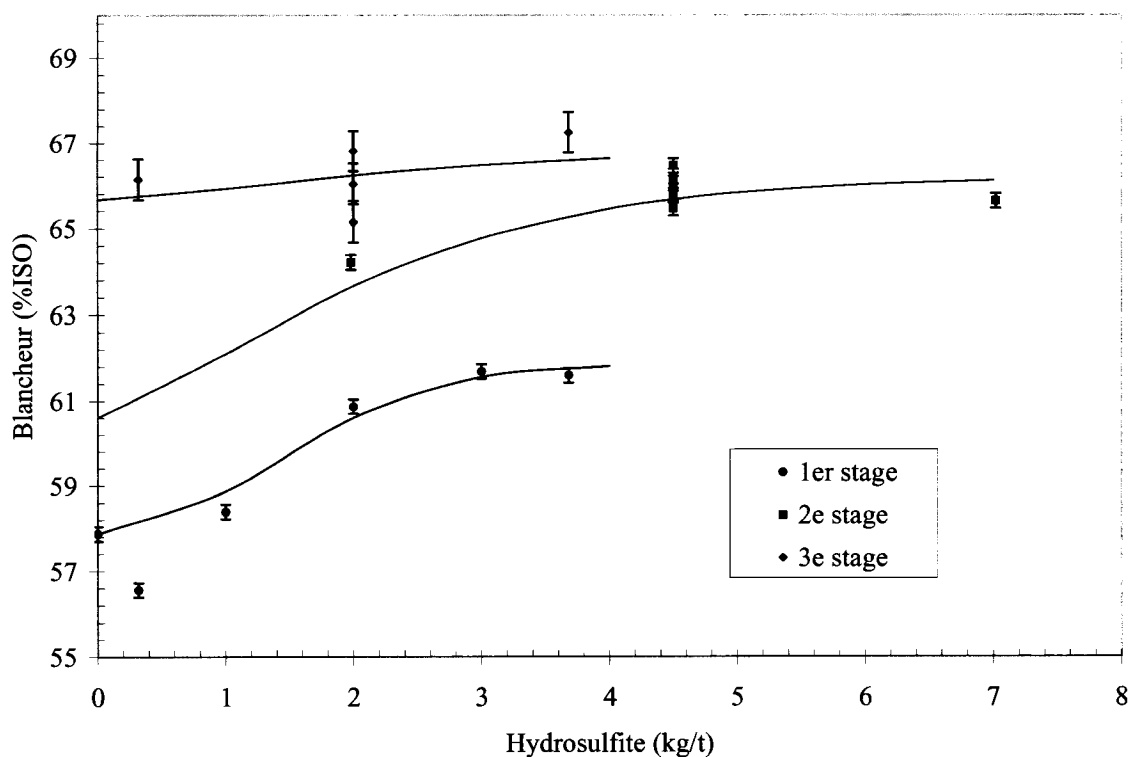


Figure 4.3 – Blancheur en fonction de l'hydrosulfite pour les copeaux frais : résultats des expériences 11 à 17 pour le 2^e stage et 13 à 17 pour le 3^e stage.

Les courbes dans la Figure 4.3 ont été ajoutées pour faciliter la lecture du graphique. Ces courbes proviennent d'une régression avec toutes les données du Tableau 4.3 sur une équation non-linéaire pour chaque stage. Les équations obtenues ne sont pas pertinentes à cette discussion et elles seront présentées dans la Section 4.5 qui traite de la modélisation du procédé. Les barres d'erreur proviennent de l'estimation de l'erreur type avec les expériences répétées. La donnée qui représente la blancheur du premier stage à 0.32 kg/t a été rejetée car la blancheur initiale de 57.8% est beaucoup plus plausible selon les échantillons de laboratoire de l'usine (et une blancheur initiale près de 55% n'est aucunement plausible). Il est possible qu'une quantité anormale d'écorce ou de pourriture soit passée dans le procédé au moment de l'échantillonnage dans le raffineur secondaire à 0.32 kg/t.

Les résultats de ces essais indiquent que la blancheur d'un stage donné dépend du dosage d'hydrosulfite et de la blancheur du stage précédent. Il est important de noter que ces expériences ont été faites sur des copeaux échantillonnés à l'intérieur d'une courte période de temps afin d'enlever l'effet de la variabilité des copeaux. Vu que les fournisseurs et les mélanges de copeaux varient souvent à l'usine, l'étape suivante est d'examiner l'effet de la qualité des copeaux sur le blanchiment additif.

4.3 EFFET DE LA QUALITÉ DES COPEAUX DE BOIS SUR LE BLANCHIMENT EN TROIS STAGES

Il existe autant de qualités de copeaux qu'il existe de combinaisons de fournisseurs à différents temps de l'année. Les copeaux échantillonnés pour les expériences décrites à la Section 4.2 sont typiques des copeaux frais car ils proviennent d'une période où l'hydrosulfite requis en contrôle manuel est faible, même lorsque la blancheur du papier dépasse la cible d'environ 0.3 points (environ 1.5 kg/t dans le premier stage et 2.75 kg/t dans le deuxième stage). Au lieu de tenter d'échantillonner des copeaux de différentes qualités, il a été décidé d'étudier un cas extrême où beaucoup d'hydrosulfite a été requis pour atteindre la blancheur finale du papier (environ 4.5 kg/t dans le premier stage, 7.5 kg/t dans le deuxième stage et 2 kg/t dans le troisième stage). Ces copeaux seront donc appelés « vieux copeaux » dans la discussion qui suit.

4.3.1 Protocole expérimental

Afin de pouvoir bien comparer les résultats des expériences avec les copeaux frais et les vieux copeaux, la planification statistique d'expérience et le protocole expérimental de la Section 4.2 ont été ré-utilisés. Vu que la pâte des vieux copeaux a été échantillonnée en période où beaucoup d'hydrosulfite est nécessaire, le personnel de l'usine a préféré réduire la quantité de pâte échantillonnée. Il n'y a donc pas eu assez de pâte échantillonnée à 2 kg/t au premier stage pour faire les essais 16 et 17 du Tableau 4.1.

4.3.2 Résultats de l'étude sur l'effet de la qualité des copeaux de bois

Les résultats des expériences en usine et en laboratoire des trois stages de blanchiment pour les vieux copeaux sont donnés dans le Tableau 4.4. Il apparaît immédiatement que les blancheurs atteintes au deuxième stage avec la pâte des vieux copeaux sont inférieures aux blancheurs des copeaux frais pour ce même stage. (moyenne de 63.0% vs 65.3%). Cependant, la blancheur initiale des vieux copeaux est inférieure à la blancheur initiale des copeaux frais (56.8% vs 57.9%), ce qui rend la comparaison plus difficile. Il faut donc regarder les gains de blancheur, qui sont discutés plus loin dans cette section.

Tableau 4.4 – Résultats des expériences de blanchiment selon la planification statistique d'expérience du Tableau 4.1

Expérience	Blancheur initiale : 56.8%		
	Dosages d'hydrosulfite (kg/t)		
	suivis de blancheur (%ISO) après chaque stage, Vieux copeaux		
	1 ^{er} stage	2 ^e stage	3 ^e stage
1	1 58.2	3 61.9	1 61.6
2	3 60.1	3 62.7	1 62.9
3	1 58.2	6 63.0	1 62.7
4	3 60.1	6 63.5	1 63.3
5	1 58.2	3 61.3	3 63.0
6	3 60.1	3 63.7	3 63.6
7	1 58.2	6 63.5	3 63.5

Tableau 4.4 (suite)

8	3 60.1	6 64.5	3 64.4
9	0.32 57.3	4.5 61.6	2 62.0
10	3.68 60.6	4.5 64.3	2 64.1
11	2 58.9	1.98 61.9	2 64.9
12	2 58.9	7.02 64.2	2 64.0
13	2 58.9	4.5 63.1	0.32 62.8
14	2 58.9	4.5 62.4	3.68 62.5
15	2 58.9	4.5 63.7	2 63.4
1 répétée	1 58.2	3 62.3	1 62.6

Un graphique analogue à la Figure 4.3 (copeaux frais) est donné dans la Figure 4.4 (vieux copeaux.) Le gain de blancheur est essentiellement nul au troisième stage : les résultats du Tableau 4.4 démontrent que le gain de blancheur au troisième stage est aussi souvent négatif que positif. Les barres d'erreur du deuxième stage sont plus importantes que dans le cas des copeaux frais car il y avait plus de variabilité entre les essais répétés.

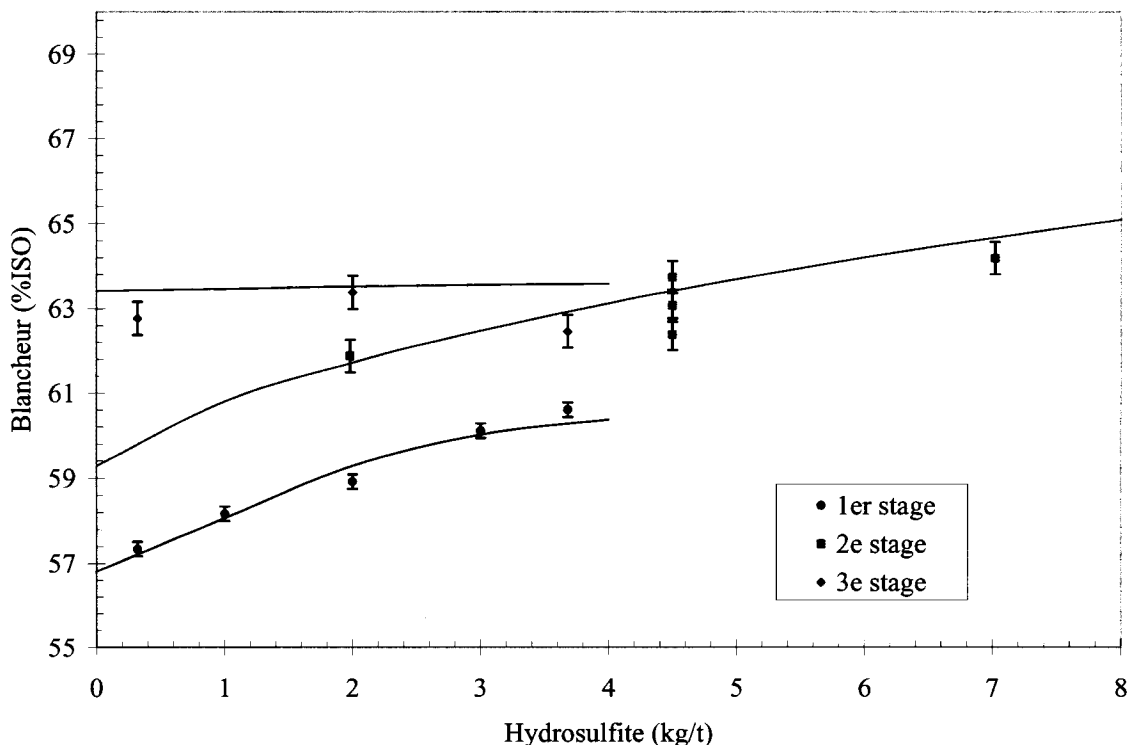


Figure 4.4 – Blancheur en fonction de l’hydrosulfite pour les vieux copeaux : résultats des expériences 11 à 15 pour le 2^e stage et 13 à 15 pour le 3^e stage.

Vu que la seule mesure de blancheur dans le procédé PTM est située après le premier stage, les données des essais en usine et en laboratoire permettent de déterminer si une blancheur fixe au premier stage assure un blanchiment constant au deuxième stage. Les courbes de la Figure 4.5 ont été produites grâce à la régression sur les données des Tableaux 4.3 et 4.4. Ce graphique démontre l’hydrosulfite requis pour atteindre 59 %ISO au premier stage et l’hydrosulfite requis pour atteindre 62 %ISO au deuxième stage, qui sont des blancheurs intermédiaires typiques de l’opération de l’usine. Ce graphique met en évidence plusieurs choses. Premièrement, le gain de blancheur du premier stage est à peu près constant pour les deux cas étudiés. Il faut donc plus

d'hydrosulfite pour atteindre 59 %ISO au premier stage avec les vieux copeaux car la blancheur initiale est plus faible. Deuxièmement, pour la même blancheur au premier stage, le gain de blancheur pour les copeaux frais et les vieux copeaux n'est pas le même au deuxième stage. En effet, le gain de blancheur pour les copeaux frais est presque le double du gain de blancheur du premier stage.

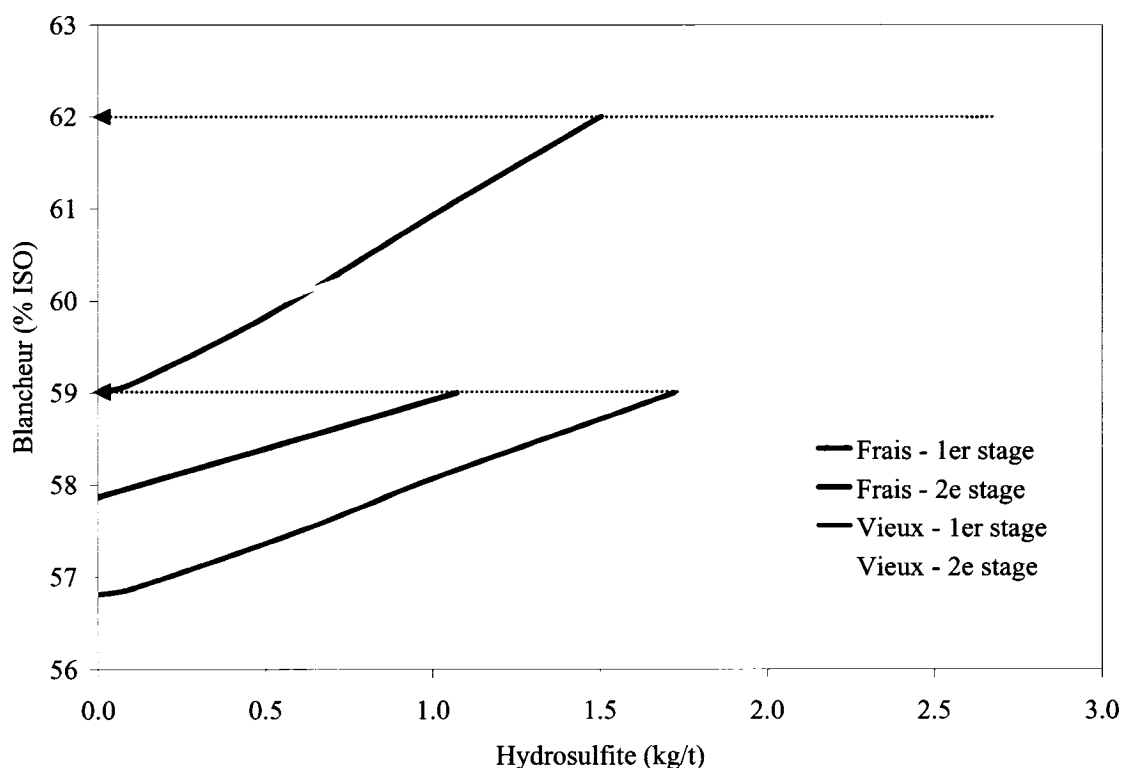


Figure 4.5 – Comparaison des expériences avec les copeaux frais et les vieux copeaux pour le premier et deuxième stage. Résultats par régression sur les données des Tableaux 4.3 et 4.4.

Cette différence de gain de blancheur au deuxième stage est typique d'un changement de blanchabilité : la blancheur du deuxième stage ne dépend donc pas seulement de la blancheur du premier stage et du dosage d'hydrosulfite du deuxième stage, elle

dépend aussi d'un autre paramètre qui indique la qualité des copeaux. De tels résultats ne figurent pas dans la littérature du blanchiment à l'hydrosulfite.

Il est important de noter que ces résultats ont été obtenus en statique pour deux extrêmes de qualités de copeaux et qu'ils n'indiquent pas à quelle fréquence ont lieu ces variations de blanchabilité.

Il faut également souligner que cette problématique de changement de gain pour le deuxième stage ne s'applique pas aux procédés de pâte chimique (McDonough *et al* 2004). Le blanchiment de la pâte chimique enlève la lignine qui est la source des changements de blanchabilité. Il n'est donc pas possible de s'appuyer sur les stratégies de contrôle existantes pour le blanchiment de la pâte chimique pour déterminer la dynamique des variations de blanchabilité.

4.4 FRÉQUENCE DES VARIATIONS DE BLANCHABILITÉ

Les résultats de la Section 4.3 suggèrent que le gain de blancheur du deuxième stage peut varier selon la qualité des copeaux, ou de leur blanchabilité. Une fois la sonde de blancheur installée après le premier stage, il a été observé que la blancheur de la pâte du premier stage varie par presque un point lorsque le dosage d'hydrosulfite est constant pendant une période de 24 heures, tel qu'illustré dans la Figure 4.6. Ces variations de blancheur perçues par la sonde ont été validées par une série d'échantillons du laboratoire.

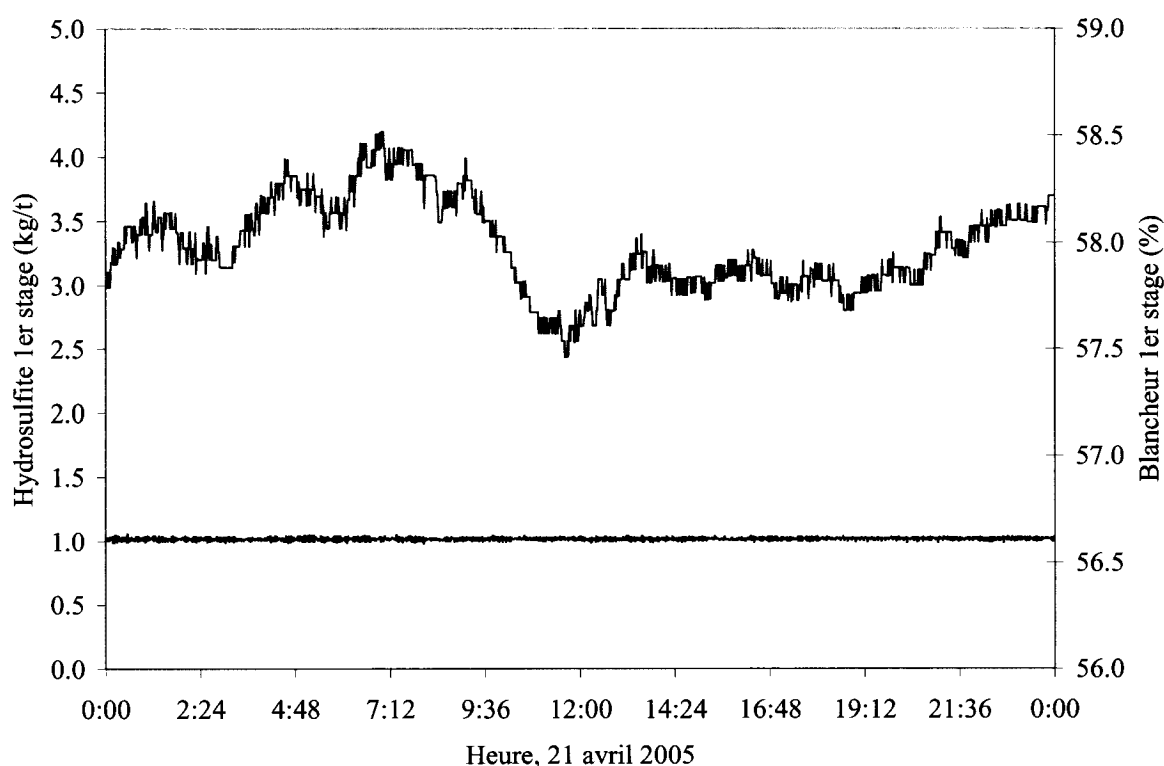


Figure 4.6 – Variations de blancheur du premier stage pour un dosage d’hydrosulfite au premier stage constant

Par ce fait même, il est important de déterminer si le gain du deuxième stage peut être prédit par l’hydrosulfite nécessaire pour atteindre une blancheur donnée au premier stage (ce qui correspond à la définition de blanchabilité de Ragnar 2004). La sonde de blancheur après le premier stage a été installée avant que l’investigation du procédé soit terminée car c’est un des seuls endroits à l’usine où les conditions du procédé permettent l’installation. L’emplacement de la sonde après le premier stage est toutefois extrêmement pertinent en sachant qu’une pâte difficile à blanchir au premier stage est également difficile à blanchir au deuxième stage. Dans le contexte de l’élaboration d’une stratégie de contrôle, l’information du premier stage pourrait donc

permettre une action anticipatoire sur le blanchiment du deuxième stage car la mesure finale de la blancheur du papier se situe plusieurs heures en aval. La prochaine étape est donc de déterminer si les variations de blancheur de la Figure 4.6 correspondent à des variations de blanchabilité.

4.4.1 Procédure d'échantillonnage en usine

Le but de l'échantillonnage en usine est l'acquisition de données du gain du deuxième stage pour différentes conditions au premier stage afin de déterminer si l'information du blanchiment au premier stage peut être utile pour prédire le comportement du deuxième stage. La procédure est très simple : il suffit d'échantillonner la pâte en usine immédiatement avant et immédiatement après le deuxième stage pour différents dosages au deuxième stage. L'échantillonnage avant et après le deuxième stage doit se faire rapidement car les variations d'hydrosulfite au deuxième stage permises à l'usine étaient de seulement 10 minutes.

La pâte échantillonnée immédiatement après le deuxième stage n'a pas atteint sa blancheur finale du point de vue cinétique. Lors d'une journée où tous les dosages d'hydrosulfite et les conditions d'opérations étaient constants, il a été vérifié que la pâte échantillonnée immédiatement après le deuxième stage est la même qu'à la sortie des tours d'entreposage, ce qui indique que la réaction de blanchiment peut se terminer dans la bouteille qui contient l'échantillon. La blancheur des échantillons était prise le lendemain dans un laboratoire de Paprican. Les bouteilles étaient

opaques afin de réduire les inversions de blancheur causées par l'exposition à la lumière.

Il n'est pas possible de provoquer volontairement des variations de blanchabilité afin que celles-ci soient un facteur dans une planification statistique d'expérience. La meilleure façon de capturer l'effet des changements de blanchabilité sur le deuxième stage est d'échantillonner la pâte sur une période de quelques semaines.

Un malentendu sur les techniques de laboratoire a révélé que la blancheur de la pâte est mesurée par la méthode Tappi au lieu de la méthode ISO à l'usine. La blancheur ISO est généralement plus élevée que la blancheur Tappi. Vu que les gains de blancheur calculés dans cette section risquent de faire partie de la stratégie de contrôle finale, la méthode Tappi a été utilisée pour déterminer la blancheur de la pâte. Il est vrai que les résultats des tests de laboratoire des Sections 4.2 et 4.3 sont donnés en blancheur ISO mais ces tests n'ont jamais eu comme objectif d'être directement utilisés dans la stratégie de contrôle car le blanchiment en laboratoire est toujours plus efficace que le blanchiment en usine, surtout à cause de l'absence d'oxygène et de l'agitation accrue. Il n'existe pas d'équation pour convertir la blancheur ISO en blancheur Tappi. (Tappi T-218 sp 97, 1998). Les résultats seront donnés en blancheur Tappi pour le reste du mémoire.

4.4.2 Résultats de l'étude de la fréquence des variations de blanchabilité

Les résultats des gains de blancheur au deuxième stage sont donnés dans la Figure 4.7 en fonction du ratio blancheur/dosage d'hydrosulfite du premier stage. Les barres d'erreur sur les gains proviennent de l'erreur type de l'échantillonnage qui a été estimé en échantillonnant trois fois l'entrée du deuxième stage à l'intérieur de 5 minutes. Les cercles autour des données ne servent qu'à faciliter la lecture afin de bien distinguer les données qui proviennent du 14 juin au 17 juillet 2005 des données du 26 juillet 2005.

Les résultats de la Figure 4.7 démontrent qu'entre le 14 juin et le 17 juillet 2005 (5 jours d'échantillonnage répartis sur toute la période) la pâte du deuxième stage a été échantillonnée alors qu'une grande gamme de dosages d'hydrosulfite [1.0, 2.4 kg/t] et de blancheurs du premier stage [56.8, 58.7 %Tappi] ont eu lieu. La gamme des dosages d'hydrosulfite du deuxième stage était de [2.3, 4.8 kg/t]. Entre le 14 juin et le 17 juillet 2005, le gain du deuxième stage est en moyenne 1.2 % Tappi t/kg. Le gain a également une moyenne de 1.2 % Tappi t/kg lors de chaque jour d'échantillonnage. Ces moyennes sont valides avec un intervalle de confiance de 95%. Il est vrai qu'il y a une grande variabilité du gain du deuxième stage mais ces variations de gain ne varient pas en fonction du dosage d'hydrosulfite du premier stage ni en fonction de la blancheur du premier stage, ni en fonction d'une combinaison des deux.

Le gain de blanchiment du deuxième stage était beaucoup plus faible le 26 juillet 2005 alors que beaucoup d'hydrosulfite était donné au premier stage (exprimé par la faible valeur sur l'abscisse de la Figure 4.7). Cette journée faisait partie de la période que les opérateurs appelle « la période des mauvais copeaux d'été ». À cause d'un congé estival des scieries, l'usine est obligée d'accumuler des copeaux et ceux-ci deviennent visiblement plus foncés au soleil. Une situation semblable se produit pendant le congé de Noël, la période pendant laquelle les « vieux copeaux » de la Section 4.3 ont été échantillonnés.

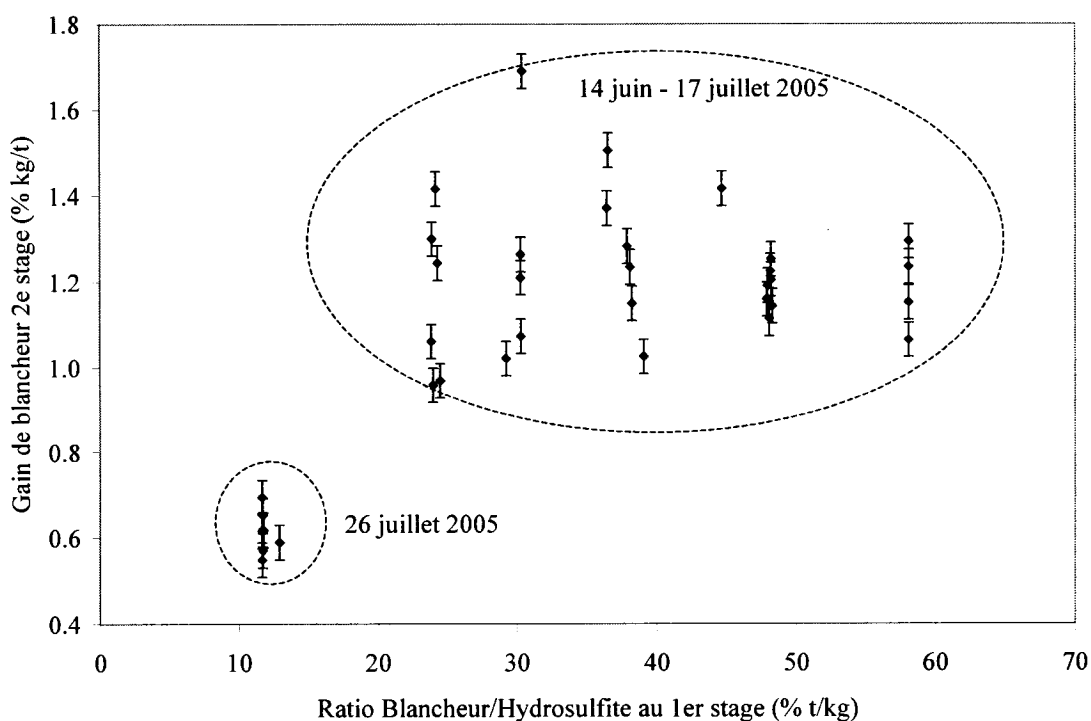


Figure 4.7 – Gain de blancheur du 2^e stage en fonction de l'utilisation d'hydrosulfite au 1^{er} stage

Bien sûr, il faudrait échantillonner la pâte du deuxième stage à l'année longue pour comprendre toutes les variations possibles du gain. Cependant, les résultats de la Figure 4.7 permettent de conclure que la blanchabilité ne varie pas à la même fréquence que les variations de blancheur de la Figure 4.6 et que les changements extrêmes de blanchabilité au deuxième stage ont lieu lors de périodes d'accumulation de copeaux (maximum 6 semaines en tout par année). Dans le contexte du développement d'une stratégie de contrôle, il est raisonnable de supposer que le gain de blancheur du deuxième stage est constant le reste du temps.

L'échantillonnage de la pâte du deuxième stage pendant qu'il n'y avait pas d'injection d'hydrosulfite au troisième stage a également révélé que la perte de blancheur à la machine à papier varie d'environ 1 point entre différentes journées. Cette variation de perte de blancheur à la machine à papier devra être prise en compte lors de l'élaboration de la stratégie de contrôle.

4.5 MODÈLE DYNAMIQUE DU PROCÉDÉ

Un modèle dynamique de toute l'opération du blanchiment a été créé afin de faciliter la conception d'une stratégie de contrôle.

4.5.1 Gains statiques

Le gain statique du premier stage est donné par l'Équation 4.2. La forme de l'équation provient de Dumont *et al* (2004) et elle décrit une courbe de blanchiment qui a une limite asymptotique qui dépend de la blancheur d'entrée. Cette équation

pour le premier stage provient d'une régression sur les équations de Dumont *et al* (2004) avec les résultats des échantillons de la Sections 4.2. La blancheur des échantillons a été convertie en blancheur Tappi par une relation linéaire obtenue en répétant la mesure d'autres échantillons en blancheur ISO et en blancheur Tappi. La blancheur sortant du stage i est donnée par y_i et l'hydrosulfite du stage i est donné par u_i . (C'est également cette forme d'équation qui a servi à tracer les courbes dans les Figures 4.3 et 4.4.)

$$y_1 = y_0 + (61.9 - y_0) * \left(1 - \exp \left(- \left(\frac{u_1^2}{3.44} \right) \right) \right) \quad (4.2)$$

Le gain statique du deuxième stage est obtenu par régression sur l'équation de Dumont avec les échantillons de pâte en usine de la Section 4.4. Les échantillons de pâte pris à de très hauts dosages au deuxième stage n'ont pas fait partie du calcul du gain de la Figure 4.7 car ils indiqueraient des gains plus petits pour une zone d'opération où l'usine n'opère pas. Cependant, ces blancheurs à hauts dosages servent à avoir une équation non-linéaire pour le deuxième stage (Équation 4.3).

$$y_2 = y_1 + (63.1 - y_1) * \left(1 - \exp \left(- \left(\frac{u_2^{1.1}}{2.89} \right) \right) \right) \quad (4.3)$$

Dans le modèle dynamique, le gain du troisième stage varie tout simplement entre 0.1 et 0.4 % t/kg de façon aléatoire à chaque quelques jours.

4.5.2 Éléments dynamiques du modèle

La dynamique du procédé de blanchiment à l'hydrosulfite est facile à modéliser car il n'est pas nécessaire de considérer la cinétique de la réaction. De plus, la plupart des opérations peuvent être simulées par des fonctions de transfert de premier ordre et des retards. La séquence complète de la simulation du procédé est donnée dans le Tableau 4.5.

Tableau 4.5 – Paramètres des blocs dans la simulation du procédé de blanchiment

Rôle dans le procédé	Bloc Simulink	Paramètres
Premier stage de blanchiment	Fonction mathématique	Équation non-linéaire 4.2
Réservoir de transfert	Fonction de transfert après le premier stage	$\tau = 10 \text{ min}$, $\theta = 4 \text{ min}$
Réservoir de latence	Fonction de transfert après la mesure de blancheur du premier stage	$\tau = 1 \text{ h}$
Deuxième stage de blanchiment	Fonction mathématique	Équation non-linéaire 4.3
Réservoir d'entreposage haute consistance	Retard variable après le deuxième stage	Retard variable aléatoire de 1 à 7 heures (augmentations et diminutions du retard)
Troisième stage de blanchiment	Gain variable	Gain varie entre 0.1 et 0.4
Réservoir de mélange	Fonction de transfert après le troisième stage	$\tau = 90 \text{ min}$, $\theta = 30 \text{ min}$
Machine à papier	Soustraction avant la mesure de blancheur finale	Soustraction de 3 points de blancheur

4.5.3 Estimation des perturbations de blancheur à la machine à papier

Il est normal que la blancheur prédite par le modèle dynamique ne donne pas la même blancheur du papier que celle observée en usine. L'ajout de la pâte cassée, les

changements de grade ne sont que deux exemples des facteurs qui affectent la blancheur du papier. De plus, le manque de connaissance sur le retard après le deuxième stage fait en sorte qu'il est impossible de comparer les réponses dynamiques de l'usine et du modèle. Le modèle ne sert qu'à explorer les stratégies de contrôle possibles.

Il n'est pas nécessaire de connaître la durée du retard dans les tours d'entreposage si une longue période où tout est constant est utilisé pour la comparaison. En prenant une période de 3 jours où la blancheur du premier stage était constante (grâce à des essais en boucle fermée avec l'hydrosulfite du premier stage), le dosage d'hydrosulfite au deuxième stage était constant et aucun hydrosulfite a été injecté au troisième stage, la différence entre la blancheur prédite par le modèle et la mesure en usine peut être calculée. Un exemple est donné à la Figure 4.8.

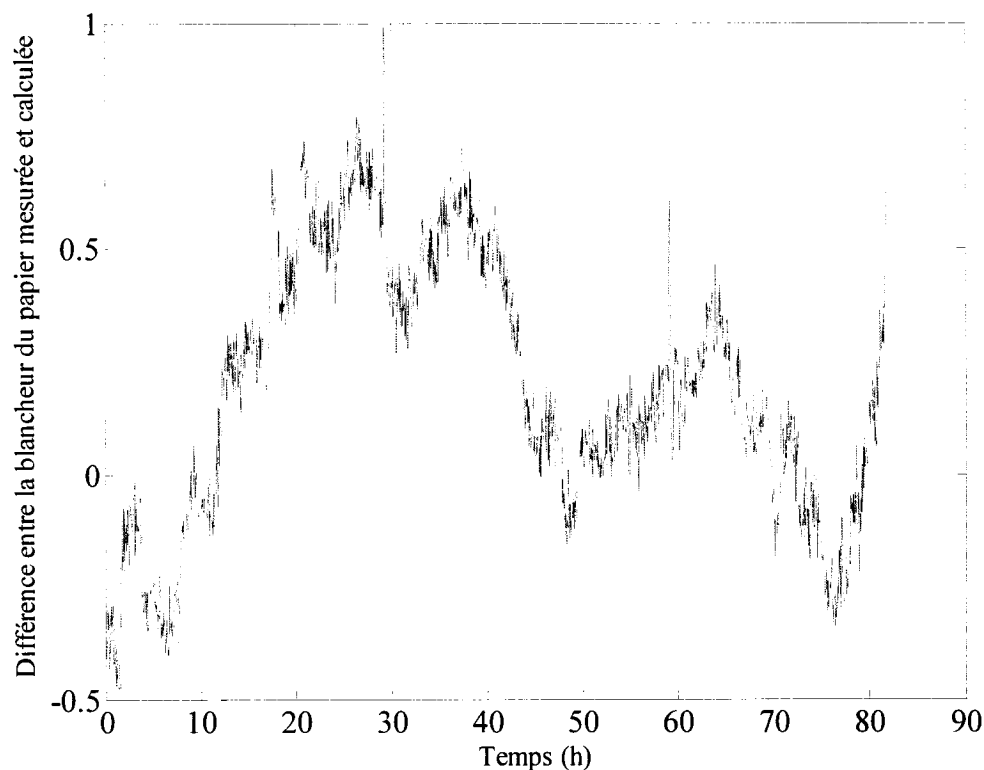


Figure 4.8 – Différence entre la blancheur du papier mesurée en usine et la blancheur du papier prédite par le modèle de la Section 4.5.2 afin d’estimer les perturbations de blancheur à la machine à papier.

La courbe illustrée à la Figure 4.8 peut donc servir comme patron de perturbations de blancheur à la machine à papier. Un signal de perturbation semblable peut également être généré par une somme de sinus, déterminée au préalable par une analyse fréquentielle des données de la Figure 4.8.

4.6 ESTIMATION DES PERTES D’HYDROSULFITE

Un des résultats escomptés de la stratégie de contrôle va être la réduction du gaspillage d’hydrosulfite, tel qu’illustré dans l’exemple de surblanchiment de la

Figure 2.2. Afin de justifier la mise en place de la stratégie de contrôle, il est intéressant d'estimer les quantités d'hydrosulfite gaspillées annuellement. Cette estimation du gaspillage a été faite sur les données historiques de l'usine d'août 2003 à octobre 2005.

Il est facile d'estimer les pertes d'hydrosulfite au troisième stage seulement. Par exemple, l'hydrosulfite gaspillé au troisième stage est tout simplement la somme de l'hydrosulfite utilisé au troisième stage lorsque la blancheur du papier est supérieure à la limite inférieure de 58.3%. Ceci correspond à 180 000\$ gaspillé entre août 2003 et octobre 2005, ce qui représente 2.7% des dépenses totales d'hydrosulfite.

Il est moins facile d'estimer le gaspillage d'hydrosulfite dans tout le procédé, surtout dans le contexte des mesures intermédiaires pas disponibles et de la perte de blancheur inconnue à la machine à papier. Une autre façon d'estimer le gaspillage d'hydrosulfite dans tout le procédé est donnée ci-dessous.

Il a été démontré dans les Sections 4.3 à 4.5 que la courbe de blanchiment aux premier et deuxième stages peut varier dans les cas extrêmes d'accumulation de copeaux. Il serait donc intéressant que l'estimation du gaspillage d'hydrosulfite tienne compte de ces périodes de copeaux foncés.

Pour le premier stage, les courbes non-linéaires de blancheur en fonction de l'hydrosulfite pour les 3 périodes (mauvais copeaux d'été, mauvais copeaux d'hiver et reste de l'année) ont été utilisées. La relation non-linéaire pour la période qui ne

correspond pas aux mauvais copeaux d'hiver ou d'été est donnée par l'Équation 4.2. Pour les périodes des mauvais copeaux, des relations semblables à l'Équation 4.2 mais avec d'autres valeurs de paramètres ont été obtenues à partir d'échantillons en usine. La blancheur en amont du premier stage n'est pas connue mais une valeur basse pour la saison a été donnée afin d'avoir une pente plus raide dans la partie initiale de la courbe, permettant ainsi un estimé plus conservateur de l'hydrosulfite gaspillé au premier stage. L'hydrosulfite qui correspond à une perte de blancheur de 0.05 points au premier stage a ainsi été estimé, et ce seulement lorsque la blancheur du papier était supérieure à 58.7%. C'est cette quantité d'hydrosulfite qui est considéré gaspillé au premier stage. De cette façon, il y a plus d'hydrosulfite qui est potentiellement gaspillé lorsque les dosages d'hydrosulfite sont assez élevés pour être près de la zone de saturation. Cette approche est illustrée à la Figure 4.9 où il est possible de voir que l'hydrosulfite qui correspond à une perte de blancheur donnée est une quantité plus importante lorsque le dosage est élevé. Il y a donc beaucoup plus de potentiel de gaspillage lorsque l'opération n'est pas à la bonne consigne lorsque le dosage est élevé.

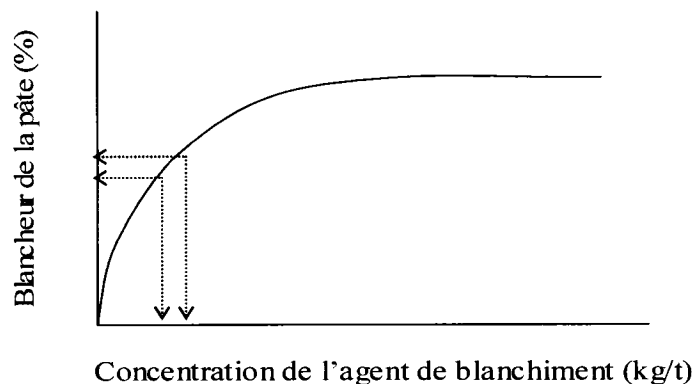


Figure 4.9 – Exemple de l'hydrosulfite associé à une perte de blancheur tolérée pour l'estimation du gaspillage d'hydrosulfite

La même approche a été utilisée pour estimer l'hydrosulfite gaspillé au deuxième stage sauf que la perte de blancheur tolérée est de 0.1 points de blancheur. Afin d'avoir un estimé conservateur, la blancheur initiale du deuxième stage n'est pas la blancheur calculée du premier stage mais une valeur basse afin de minimiser le calcul des pertes à faibles dosages.

Pour le troisième stage, tout l'hydrosulfite fournit lorsque la blancheur du papier est supérieure à 58.9% est considéré gaspillé. Ceci est un estimé très conservateur car la cible de blancheur du papier est de 58.8% et les opérateurs sont censés seulement utiliser l'hydrosulfite au troisième stage lorsque la blancheur tombe sous 58.3%. La limite conservatrice de 58.9% est utilisée afin de pouvoir répartir l'estimé du gaspillage d'hydrosulfite sur les trois stages.

Les pertes cumulatives d'hydrosulfite sont données dans la Figure 4.10. Le coût de l'hydrosulfite est de 0.32\$/kg, ce qui donne 200 000\$ gaspillé entre août 2003 et octobre 2005. Ce montant représente environ 3% des dépenses totales d'hydrosulfite.

Il n'y a pas de données disponibles pour l'estimation des coûts associés au surblanchiment au troisième stage. La prévention des cas de surblanchiment au troisième stage va prévenir les cas d'insatisfaction des clients qui ont reçu du papier ayant des odeurs de soufre et elle va aussi réduire la corrosion de l'équipement au bout humide de la machine à papier.

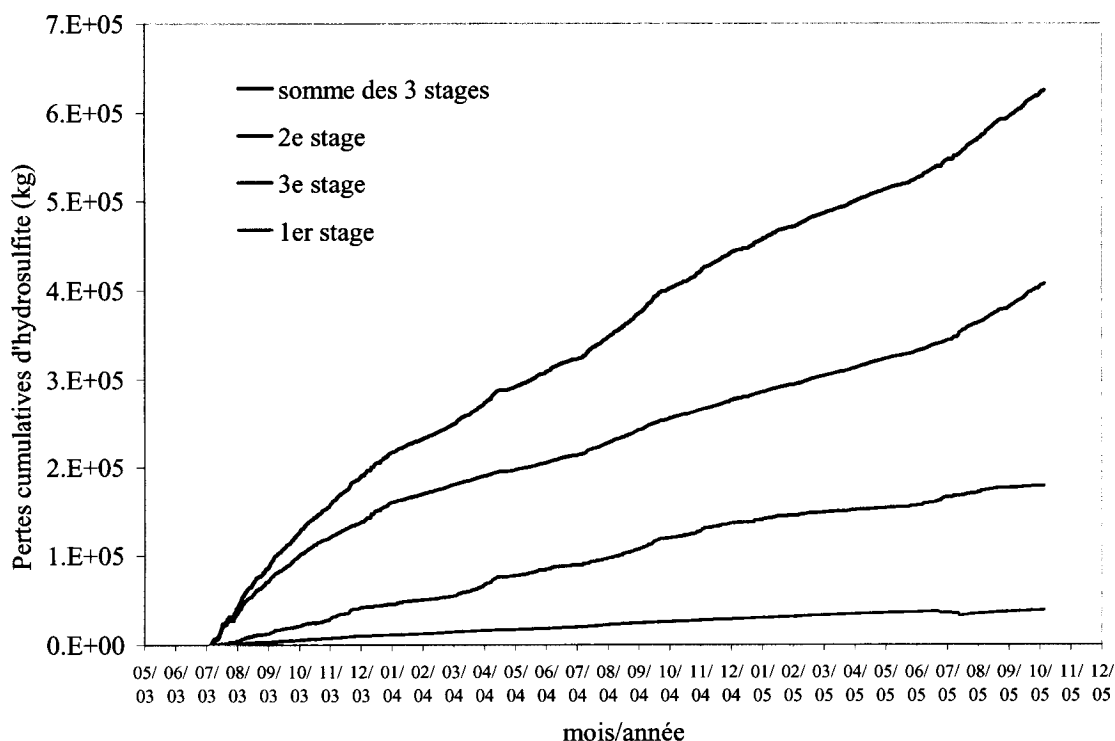


Figure 4.10 – Gaspillage d’hydrosulfite cumulatif estimé

4.7 CONCLUSIONS DE L’INVESTIGATION DU PROCÉDÉ

L’investigation du procédé a révélé plusieurs informations qui doivent être prises en compte lors de l’élaboration d’une stratégie de contrôle. Ces informations sont résumées dans la liste ci-dessous.

- Le blanchiment au premier stage est essentiellement linéaire et la dynamique du point d’injection jusqu’à la mesure de blancheur est rapide.
- Le gain du deuxième stage est constant sauf dans les périodes d’accumulation des copeaux à l’hiver et à l’été. Ces périodes durent au

maximum 6 semaines par année donc la stratégie de contrôle sera développée pour les 46 autres semaines de l'année.

- Le gain du troisième stage n'est pas constant et peut même être négatif.
- La perte de blancheur à la machine à papier n'est pas constante.
- Il existe plusieurs perturbations sur la blancheur du papier qui ne sont pas causées par dosages d'hydrosulfite.
- L'élaboration de la stratégie de contrôle est justifiée par les coûts associés au surblanchiment.

La stratégie de contrôle proposée qui tient en compte des points ci-dessus ainsi que les résultats de l'implantation en usine seront traités dans le Chapitre 5.

CHAPITRE 5 : DÉVELOPPEMENT D'UNE STRATÉGIE DE CONTRÔLE

Les objectifs de contrôle énumérés à la Section 2.3 sont les suivants :

- Maintenir la blancheur du papier à son point de consigne.
- S'assurer que la blancheur du papier ne tombe pas sous sa limite inférieure de blancheur.
- Minimiser l'utilisation du troisième stage de blanchiment.

La stratégie de contrôle proposée doit être utile pendant l'opération normale de l'usine. Il a été décidé que la stratégie de contrôle ne sera pas nécessairement applicable lors des 6 semaines par année où les copeaux de bois sont très foncés. L'expérience en usine démontre que les trois points d'injection d'hydrosulfite doivent être près de leur limite maximale quand les copeaux sont foncés, ce qui est une autre raison pour laquelle une stratégie de contrôle n'est pas utile pendant cette période.

5.1 ALGORITHME PROPOSÉ

La structure de la stratégie de contrôle proposée est illustrée à la Figure 5.1. Tous les contrôleurs sont de type PI afin de permettre l'implantation en usine sur un système de commande distribué.

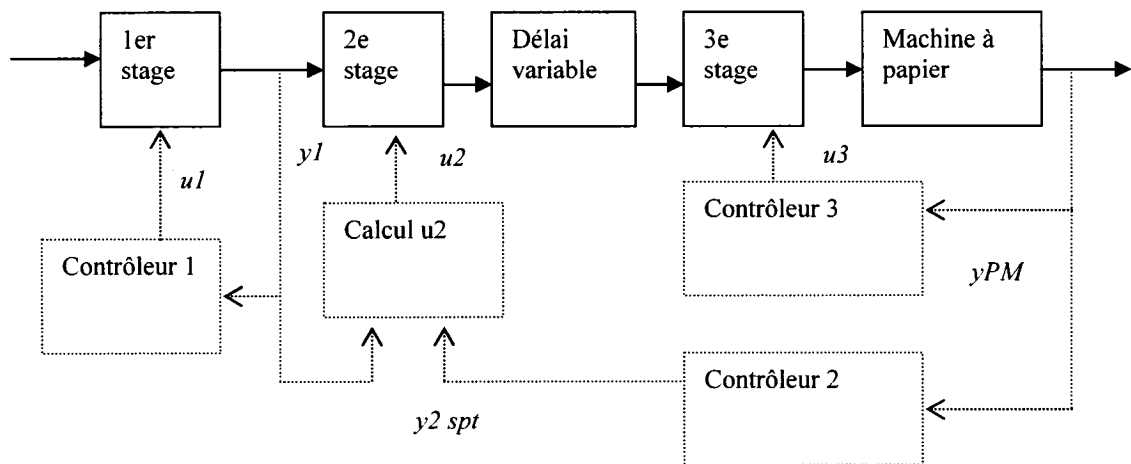


Figure 5.1 – Structure de la stratégie de contrôle proposée

Le contrôleur 1 maintient la blancheur du premier stage à son point de consigne. La variable manipulée du contrôleur 1 est l'hydrosulfite du premier stage et la variable contrôlée est la blancheur du premier stage, mesurée par la sonde de blancheur. Tel qu'indiqué dans le Tableau 4.5, la dynamique entre l'injection d'hydrosulfite au premier stage et la mesure de blancheur y_1 est un premier ordre avec retard ($\tau = 10$ min, $\theta = 4$ min) donc ce contrôleur peut être assez rapide.

La variable contrôlée du contrôleur 3 est la blancheur du papier et sa variable manipulée est l'hydrosulfite au troisième stage. La variable contrôlée du contrôleur 2 est également la blancheur du papier et sa variable manipulée est une consigne de blancheur pour le deuxième stage. Le point de consigne du contrôleur 3 est la limite inférieure de la blancheur du papier tandis que le point de consigne du contrôleur 2 est la cible de blancheur du papier. Le contrôleur 3 sert donc à rétablir la blancheur en cas d'une perturbation soudaine qui cause une chute sous la limite inférieure de blancheur. Le contrôleur 3 doit être rapide. Le contrôleur 2 doit être lent car le retard dans les tours d'entreposage est important et n'est pas connu. Un contrôleur 2 trop rapide ou trop agressif pourrait rendre la blancheur finale instable.

Le point de consigne de blancheur pour le deuxième stage dicté par le contrôleur 2 (y_{2spt}) sert à calculer l'hydrosulfite commandé au deuxième stage, tout en utilisant la mesure de blancheur du premier stage (y_1). Vu que le gain de blancheur du deuxième stage est connu ($k_2 = 1.2 \text{ \% t/kg}$, voir Section 4.4), il est très simple de calculer l'hydrosulfite qui doit être injecté au deuxième stage, tel que décrit par l'Équation 5.1.

$$u_2 = \frac{(y_{2spt} - y_1)}{k_2} \quad (5.1)$$

Il est à noter que le réservoir de latence sépare la mesure de blancheur du premier stage de l'entrée du deuxième stage. La mesure de blancheur du premier stage doit donc être filtrée selon la dynamique du réservoir de la latence lorsqu'elle est utilisée dans l'Équation 5.1.

Il y a plusieurs avantages reliés à cette stratégie de contrôle. Cette stratégie de contrôle est facile à implanter en usine et elle est facile à comprendre pour les opérateurs. En effet, cette stratégie de contrôle ne fait qu'automatiser ce que les opérateurs doivent faire : utiliser le troisième stage de blanchiment seulement en cas de chutes dramatiques de blancheur et utiliser le deuxième stage pour corriger les dérives lentes du procédé. Un autre avantage est que le contrôleur 2 pousse indirectement l'hydrosulfite du troisième stage à zéro car le point de consigne du contrôleur 2 est plus élevé que le point de consigne du contrôleur 3 et ils ont tous les deux la même variable contrôlée. Un autre avantage est que l'unique sonde de blancheur dans le procédé PTM est utilisée pour dicter l'hydrosulfite dans les deux stages principaux, ce qui maximise l'usage de l'instrumentation disponible. De plus, dans le cas où le contrôleur 1 serait oublié d'être mis en fonction ou si celui-ci est saturé, la stratégie de contrôle est encore valide car l'hydrosulfite au deuxième stage va tout simplement suivre les variations de blancheur au premier stage, en plus des variations lentes de blancheur à la machine à papier.

L'utilisation de l'unique sonde de blancheur pour dicter l'hydrosulfite aux premier et deuxième stages est également un désavantage car la sonde de blancheur peut être en dérive. Une solution à ce problème est proposée par l'algorithme de détection de dérive de sonde de la Section 5.5.1. Un autre désavantage de la stratégie de contrôle proposée est que le gain de blancheur du troisième stage est toujours supposé être du même signe et du même ordre de grandeur. Or, le gain de blanchiment au troisième

stage n'est pas bien connu et il peut changer de signe. Ceci peut être problématique car le contrôleur 3 doit être réglé agressivement. Une stratégie d'estimation du gain du troisième stage est proposée à la Section 5.5.2. Un autre désavantage de la stratégie de contrôle est que les perturbations rapides sur la blancheur du papier ne seront jamais rejetées à moins que la blancheur soit sous sa limite inférieure. Ceci fait partie du compromis incontournable de la stratégie de contrôle : l'hydrosulfite du troisième stage doit être minimisé mais celui-ci pourrait facilement corriger plusieurs perturbations rapides sur la blancheur du papier.

Le point de consigne pour la blancheur du premier stage doit être choisi par l'opérateur. Il y a certainement un choix optimal pour cette consigne de blancheur qui minimise l'utilisation totale d'hydrosulfite mais cette optimisation ne fait pas partie de ce mémoire.

Pendant un arrêt du procédé PTM, la pâte est soutirée des tours d'entreposage et envoyée vers la machine à papier. Seul le contrôleur 3 est gardé en fonction afin de corriger les cas de basses blancheurs. Pendant un arrêt de la machine à papier, la mesure de la blancheur du papier avant l'arrêt est conservée comme entrée au contrôleur 2.

5.2 RÉSULTATS DE SIMULATION DE L'ALGORITHME PROPOSÉ

La stratégie de contrôle proposée a été simulée en utilisant le modèle dynamique du procédé de blanchiment décrit à la Section 4.5. Il est important de rappeler que ce

modèle dynamique contient des retards variables après le deuxième stage. Les paramètres du contrôleur 1 seront déterminés par le personnel d'instrumentation de l'usine car il s'agit d'une boucle de contrôle simple dont l'implantation fait bien partie de leur mandat. Les paramètres des contrôleurs 2 et 3 sont déterminés par essai-erreur pour obtenir le comportement voulu en simulation. Le contrôleur 2 a comme paramètres suggérés : gain du contrôleur $0.35 \text{ kg/t } \%$ et constante intégrale de 4 heures. Le contrôleur 3 peut tout simplement être un contrôleur proportionnel (gain de $5 \text{ kg/t } \%$) car l'atteinte de la consigne de la limite inférieure de blancheur n'est pas pertinente à la stratégie. Il suffit d'ajouter de l'hydrosulfite lorsque la blancheur est sous la limite inférieure (et ce, de façon proportionnelle à l'erreur) et de ne pas en mettre lorsque la blancheur est au-dessus de la limite inférieure de blancheur. Les résultats de simulation sont donnés à la Figure 5.2. Seuls les résultats des contrôleurs 2 et 3 sont donnés dans la Figure 5.2 car le contrôleur 1 est très rapide et produit une blancheur uniforme au premier stage.

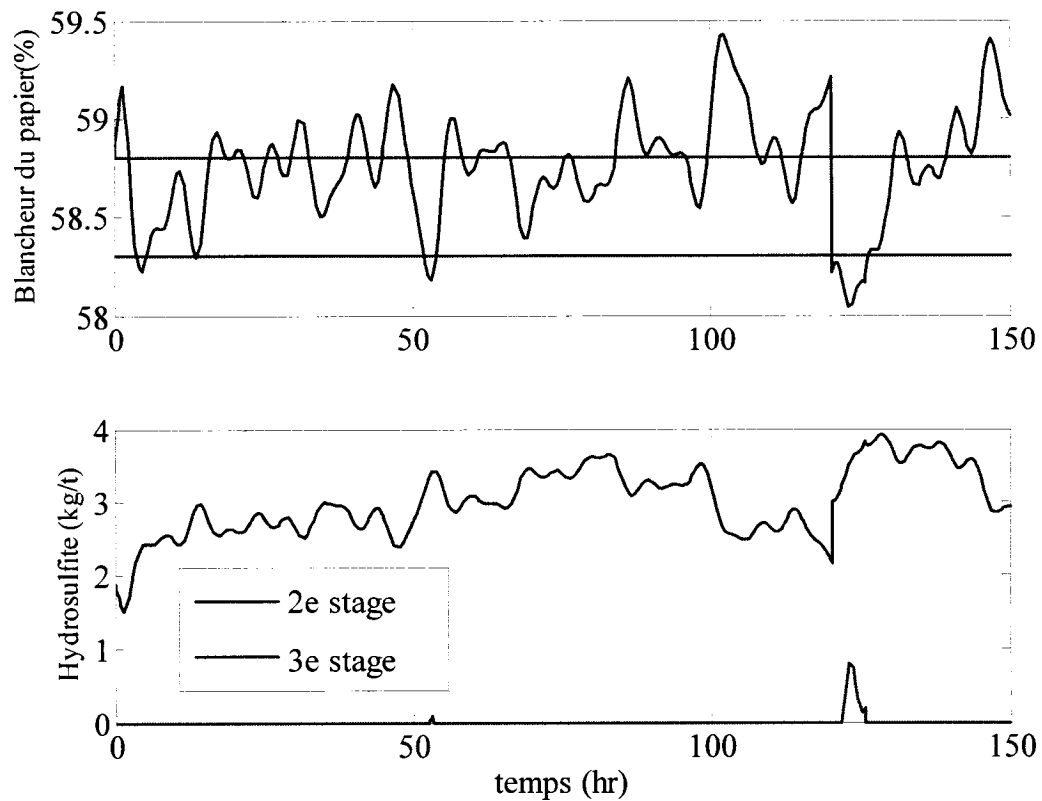


Figure 5.2 – Résultats de simulation de la stratégie de contrôleur proposée

Tel qu'attendu, la stratégie de contrôle ne corrige pas plusieurs perturbations à la machine à papier. Cependant, il est possible de voir que l'hydrosulfite au deuxième stage a tranquillement augmenté pendant les 70 premières heures de la simulation, pendant laquelle une dérive vers le bas de la blancheur du papier a eu lieu. L'hydrosulfite du troisième stage est seulement intervenu lorsque la blancheur du papier est tombée sous la limite inférieure de blancheur. La simulation démontre alors que chaque dosage d'hydrosulfite intervient lorsque nécessaire : le deuxième stage

corrige les dérives lentes de blancheur et le troisième stage est utilisé pour remonter la blancheur au dessus de la limite inférieure de blancheur.

5.3 COMPARAISON AVEC UN ALGORITHME MPC OPTIMAL

D'une part, la stratégie de contrôle proposée à la Section 5.1 est simple et facile à implanter en usine. D'une autre part, la commande prédictive (« Model Predictive Control » ou « MPC ») est souvent utilisée pour le contrôle de procédés complexes mais son implantation requiert plus de ressources. L'objectif de cette section est donc de comparer la performance de la stratégie proposée avec la performance de la commande prédictive afin de justifier l'utilisation d'une stratégie aussi simple. La commande prédictive sert donc d'étalon pour évaluer la performance de la stratégie de contrôle proposée.

5.3.1 Structure de l'algorithme de commande prédictive utilisée

L'algorithme de commande prédictive est bien documenté et sa description ne fait pas partie de ce mémoire (Bequette, 2003). La structure de la commande particulière à la problématique du blanchiment en plusieurs stages a été développée en simulation par Bogomolova (2005) à partir du « Model Predictive Control Toolbox » de Matlab. L'algorithme contient un modèle entre chacune des 4 entrées (blancheur initiale et 3 dosages d'hydrosulfite) et des trois sorties (blancheurs après chaque stage). Afin de refléter la réalité de l'usine, seules la blancheur du premier stage et la blancheur finale sont mesurées et envoyées au contrôleur. Les variables manipulées sont les trois dosages d'hydrosulfite. Un poids a été ajouté sur l'utilisation de l'hydrosulfite du

troisième stage dans la fonction objectif du contrôleur. Cet ajout du poids (d'une valeur de 0.5) a pour but la minimisation de l'hydrosulfite au troisième stage. La période de temps est de 0.2 heures, l'horizon de prédiction est de 200 périodes de temps et l'horizon de contrôle est de une période de temps. Ces valeurs ont été recommandées dans Bogomolova (2005) pour donner le meilleur réglage possible. D'autres valeurs ont été essayées sans toutefois surpasser la performance associée au réglage ci-dessus.

5.3.2 Choix des points de consigne optimaux pour chaque stage

Les conditions nominales de la commande prédictive et de la comparaison avec la stratégie de contrôle proposée doivent être l'opération optimale de l'usine pour une blancheur initiale donnée. L'opération optimale de l'usine est donc au point où la consommation d'hydrosulfite est minimale.

La problématique du choix des points de consigne optimaux pour un procédé de blanchiment en plusieurs stages a été présentée par Dumont *et al* (2004) mais la discussion qui suit sert à valider mathématiquement les propos de ces auteurs.

Le problème d'optimisation statique est la minimisation de la consommation totale d'hydrosulfite et il est donné par l'Équation 5.2.

$$J = \min \sum_i u_i \quad (5.2)$$

Chaque stage de blanchiment est décrit par l'Équation 5.3, où les paramètres a , b et c sont propres à chaque stage. Afin d'avoir qu'un minimum global, il est préférable que l'Équation 5.3 pour chaque stage soit monotone croissante.

$$y_i = y_{i-1} + (a_i - y_{i-1}) * \left(1 - \exp \left(- \left(\frac{u_i^{b_i}}{c_i} \right) \right) \right) \quad (5.3)$$

ou

$$y_i = y_{i-1} + (a_i - y_{i-1}) * f_n(u_n) \quad (5.4)$$

L'Équation 5.4, reformulée ci-dessous et en simplifiant $f_n(u_n)$ par f_n est donnée par l'Équation 5.5.

$$y_n = y_{n-1}(1 - f_n) + a_n f_n \quad (5.5)$$

En combinant l'Équation 5.5 pour chaque stage, la blancheur finale peut être exprimée en fonction de la blancheur initiale :

$$y_3 = y_0(1 - f_1)(1 - f_2)(1 - f_3) + a_1 f_1(1 - f_2)(1 - f_3) + a_2 f_2(1 - f_3) + a_3 f_3 \quad (5.6)$$

En utilisant la fonction objectif de l'Équation 5.2, le problème d'optimisation est écrit comme suit avec des contraintes d'inégalité sur les dosages d'hydrosulfite afin que ceux-ci soient positifs :

$$L = \sum u_i + \lambda(y_0(1 - f_1)(1 - f_2)(1 - f_3) + a_1 f_1(1 - f_2)(1 - f_3) + a_2 f_2(1 - f_3) + a_3 f_3 - y_3) + \mu_1(-u_1) + \mu_2(-u_2) + \mu_3(-u_3) \quad (5.7)$$

Lorsque ces contraintes d'inégalité ne sont pas actives (donc $\mu_i = 0$) et en dérivant l'équation 5.7 par rapport à chaque variable de décision u_i et en faisant l'égalité de chaque dérivée, la condition d'optimalité obtenue est

$$\frac{\partial y_1}{\partial u_1} (1 - f_2)(1 - f_3) = \frac{\partial y_2}{\partial u_2} (1 - f_3) = \frac{\partial y_3}{\partial u_3} \quad (5.8)$$

La pente de blancheur doit donc décroître de stage en stage tout en satisfaisant l'Équation 5.8 afin d'avoir les points de consigne optimaux après chaque stage.

Dumont *et al* (2004) énoncent que l'allocation optimale de produits chimiques se produit lorsque la pente de blancheur est égale dans tous les stages. En utilisant l'approche décrite ci-dessus, il est facilement vérifiable que la condition d'optimalité des pentes égales correspond au cas où l'incrément de blancheur ne dépendrait pas de la blancheur du stage précédent. Or, les équations de blancheur présentées dans Dumont *et al* (2004) sont de la forme de l'Équation 5.3 où l'incrément de blancheur dépend de la blancheur du stage précédent.

Dans le contexte de la comparaison de la stratégie de contrôle proposée avec la commande prédictive, il suffit de trouver les points d'opération optimaux pour les deux premiers stages car l'opération nominale souhaitée du troisième stage est à un dosage de zéro. Par exemple, pour une blancheur initiale de copeaux de 57.2 %, et une perte de blancheur de trois points dans la machine à papier, l'utilisation optimale

d'hydrosulfite est de 2.4 kg/t au premier stage (blancheur de 60.9%) et de 1.5 kg/t au deuxième stage (blancheur de 61.8%).

5.3.3 Résultats du MPC optimal

L'opération nominale du premier et du deuxième stage a été fixée aux points d'opération optimaux, tel que déterminé dans la Section 5.3.2, pour la simulation par commande prédictive et pour la simulation de la stratégie de contrôle proposée. Les résultats des deux stratégies de contrôle sont donnés dans la Figure 5.3.

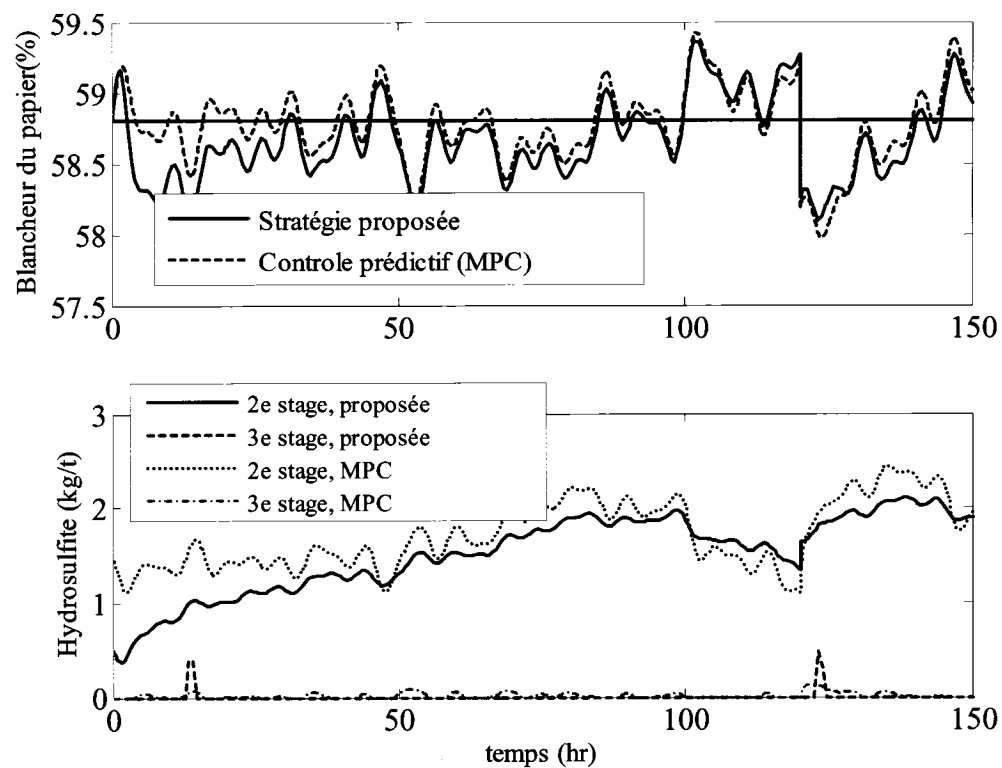


Figure 5.3 – Résultats de simulation de la stratégie de contrôle proposée comparée à la commande prédictive

Les résultats de la Figure 5.3 démontrent que la performance de l'algorithme donne une blancheur du papier très similaire. De plus, il est évident que la commande prédictive utilise davantage d'hydrosulfite au troisième stage que la stratégie proposée. Il est donc plus facile d'avoir un point de consigne plus bas pour prévenir l'utilisation d'hydrosulfite au troisième stage. Les mesures de performance des deux stratégies sont données dans le Tableau 5.1.

Tableau 5.1 – Mesures de performance de la stratégie de contrôle proposée et de la commande prédictive, intégrales de l'erreur sur 150 heures de simulation

Stratégie de contrôle	IAE blancheur papier	IAE hydrosulfite deuxième stage	IAE hydrosulfite troisième stage
Stratégie proposée	31.4	211.8	0.6
Commande prédictive	27.8	230.1	2.5

Certes, il est possible d'augmenter le poids sur l'hydrosulfite du troisième stage dans la stratégie de commande prédictive pour réduire la consommation de celui-ci. Bien que ceci réduise la quantité d'hydrosulfite consommée au troisième stage, la blancheur du papier est compromise.

5.4 RÉSULTATS DE L'IMPLANTATION EN USINE

La stratégie de contrôle proposée à la Section 5.1 a été implantée en usine. Les résultats présentés dans cette section démontrent l'évolution de la stratégie de contrôle lors de son implantation et son impact sur la blancheur du papier. Les paramètres des contrôleurs sont ceux donnés à la Section 5.2 sauf qu'une action intégrale sur le contrôleur 3 lorsque la blancheur est sous sa consigne ($\tau_I = 30$ min) a été ajoutée par le personnel de l'usine. Cet ajout permet d'assurer la production du papier à la limite inférieure de blancheur dans le cas d'une perturbation de blancheur de longue durée.

5.4.1 Exemples d'un bon et mauvais contrôle manuel

Deux exemples de la performance du contrôle manuel sont donnés ci-dessous pour fins de comparaison avec le contrôle automatique. La Figure 5.4 illustre un exemple d'un bon contrôle manuel tandis que la Figure 5.5 illustre un exemple d'un mauvais contrôle manuel. Dans le cas du bon contrôle manuel, la blancheur du papier suit la consigne (ligne verte) et ne tombe jamais sous la limite inférieure (ligne rouge). L'opérateur a choisi de ne pas utiliser d'hydrosulfite au troisième stage car la blancheur du papier n'est pas assez basse. Il est à noter que dans la période de temps illustrée à la Figure 5.4, il n'y a pas eu de perturbations de blancheur qui ont fait en sorte que celle-ci chute sous sa limite inférieure. Les autres perturbations de blancheur n'ont pas une grande amplitude.

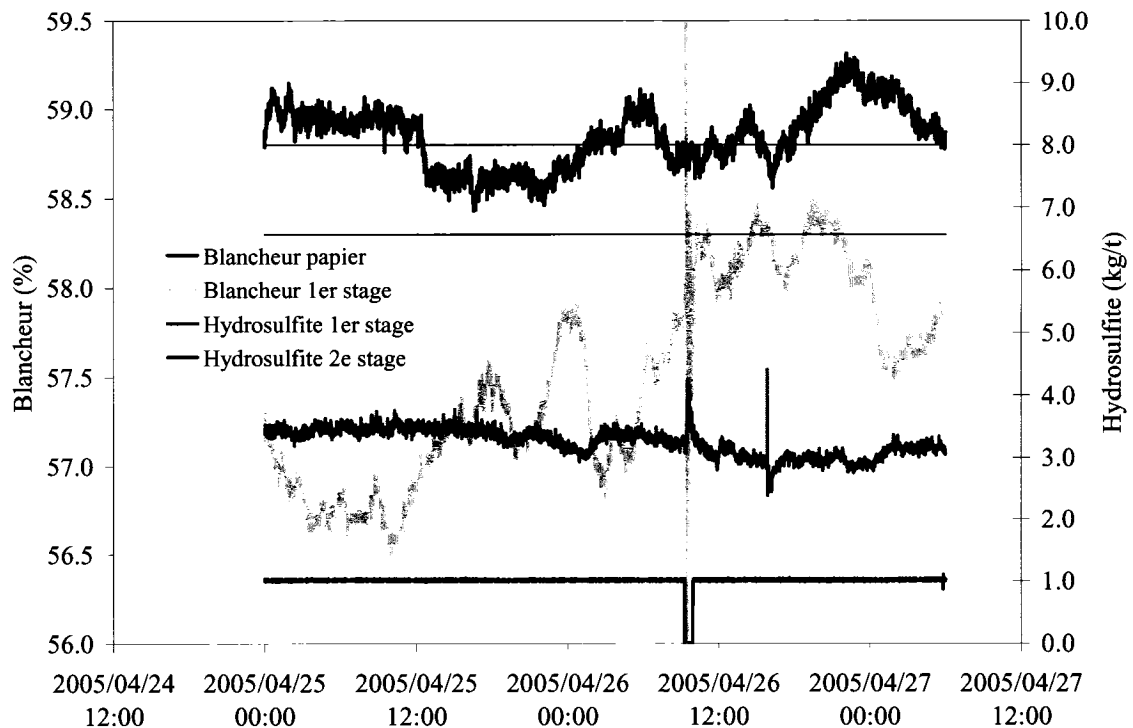


Figure 5.4 – Exemple d’un bon contrôle manuel

L’exemple du mauvais contrôle manuel est repris de la Figure 2.2 à la Figure 5.5. La blancheur du papier ne tombe jamais sous sa cible inférieure mais l’hydrosulfite du troisième stage est souvent utilisé, ce qui est une erreur de la part de l’opérateur. Il s’agit donc d’un gaspillage total de l’hydrosulfite au troisième stage. De plus, les variations d’hydrosulfite aux deuxième et troisième stages contribuent à la variabilité de la blancheur du papier. La mesure de blancheur du premier stage n’était pas disponible pendant cette période.

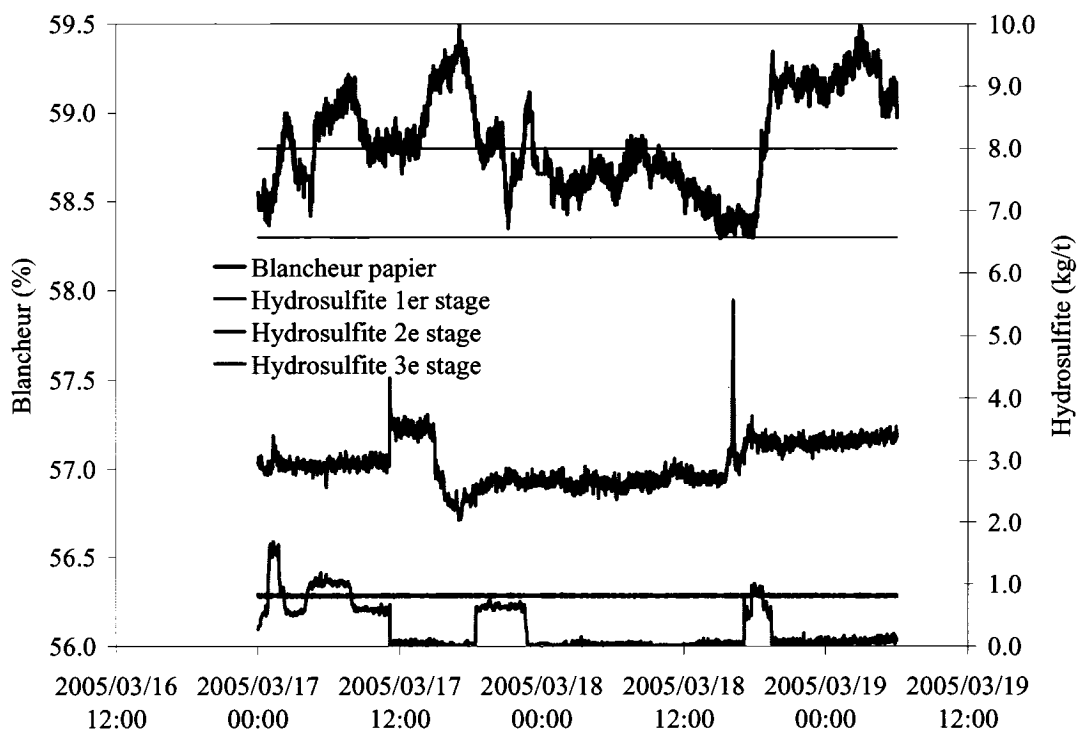


Figure 5.5 – Exemple d'un mauvais contrôle manuel

5.4.2 Effet du contrôle au premier stage sur la variabilité de la blancheur finale

Le contrôleur 1 est celui qui maintient la blancheur du premier stage à sa consigne en manipulant l'hydrosulfite du premier stage. Cette boucle de contrôle est très simple et elle a été la première partie de la stratégie de contrôle à être implantée.

Les résultats de la Figure 5.6 démontrent que la blancheur du premier stage est maintenue constante grâce aux variations d'hydrosulfite du premier stage mais que la variabilité de la blancheur du papier n'est pas compromise : son écart-type est même inférieur à celui de la blancheur du papier de la Figure 5.4. Malheureusement, un

surblanchiment a eu lieu au deuxième stage qui était encore contrôlé manuellement, ce qui fait que la blancheur du papier est bien au-dessus de la sa consigne.

L'hydrosulfite du troisième stage n'a pas été utilisé dans le cas de la Figure 5.6.

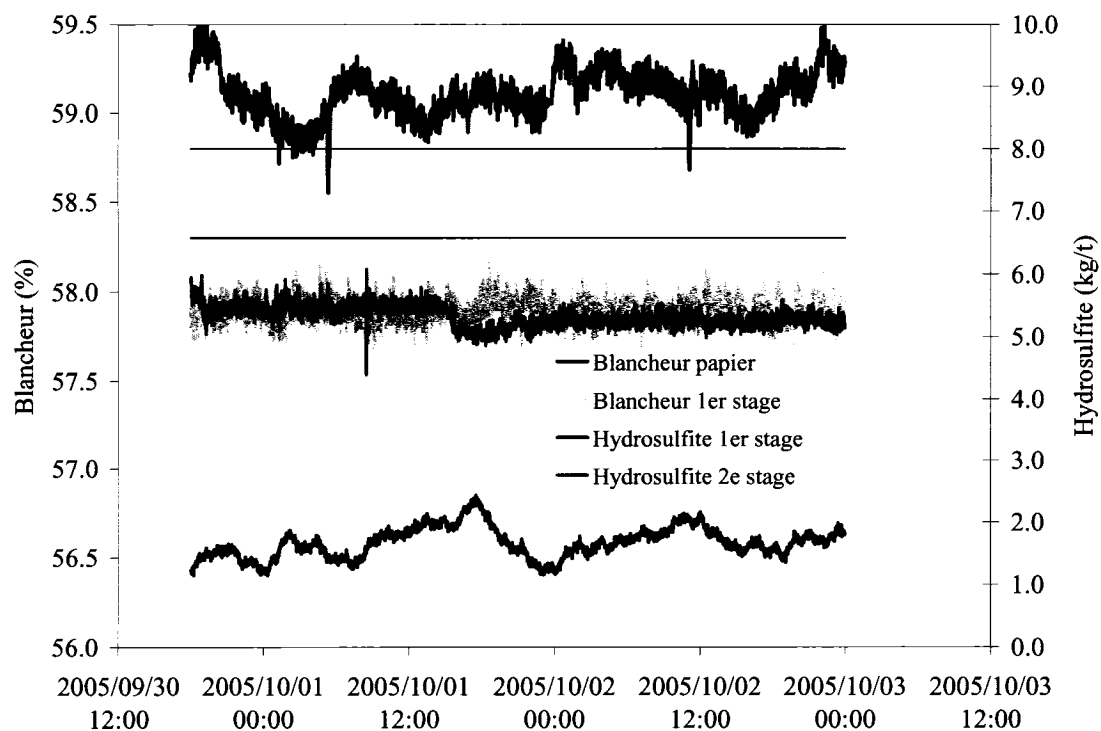


Figure 5.6 – Exemple où seulement la blancheur du premier stage est contrôlée

5.4.3 Effet du contrôle au deuxième stage sur la variabilité de la blancheur finale

La transition à la stratégie de contrôle pour assurer la manipulation de l'hydrosulfite du deuxième stage est illustrée à la Figure 5.7. La transition a lieu à 8 :00 le 30 janvier 2006. Cette figure démontre tout simplement que l'hydrosulfite du deuxième stage est lentement réduit afin que la blancheur du papier soit aux environs de la consigne de blancheur. Une perturbation de blancheur rapide, comme le pic de blancheur qui a eu lieu pendant l'avant-midi du 31 janvier 2006 à cause d'un changement de grade, n'est pas corrigée par la stratégie de contrôle.

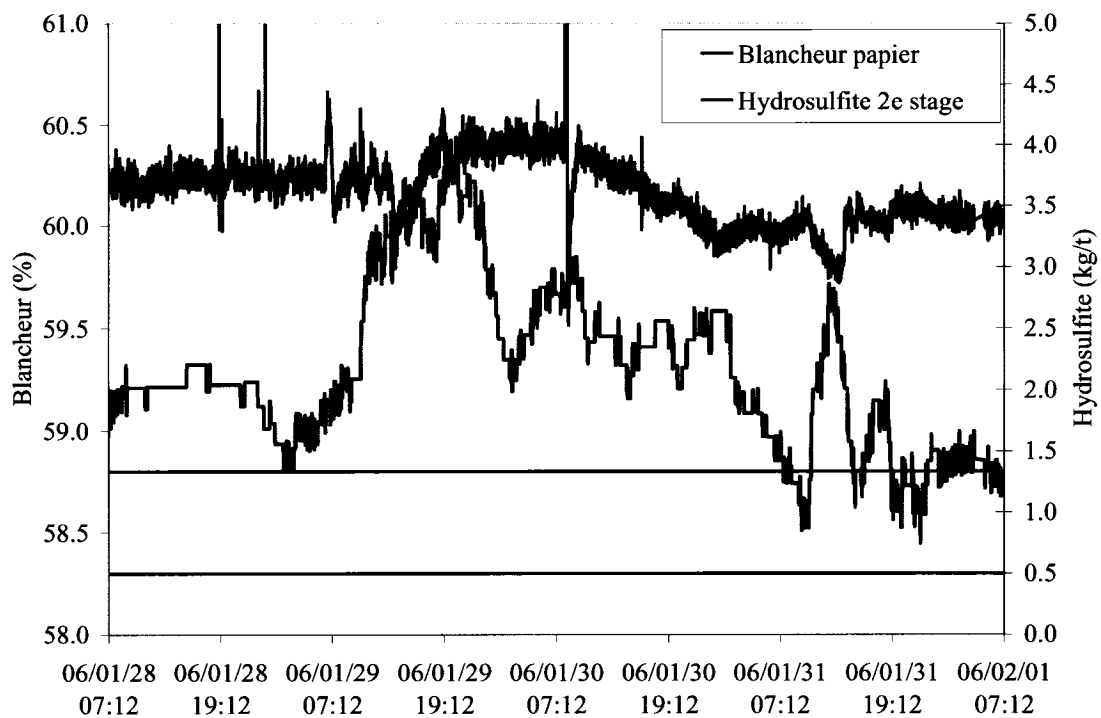


Figure 5.7 – Transition à la manipulation de l'hydrosulfite du deuxième stage selon le contrôleur 2, 30 janvier 8 :00

La Figure 5.8 démontre la performance de la stratégie de contrôle complète. Cependant, le contrôleur 1 est saturé car une consigne de blancheur trop basse a été donnée au premier stage. L'hydrosulfite du deuxième stage suit inversement la blancheur du premier stage et le signal intégré de la blancheur du papier. La blancheur du papier est près de sa consigne et son écart type est comparable à l'écart type de la blancheur du papier lors du bon contrôle manuel.

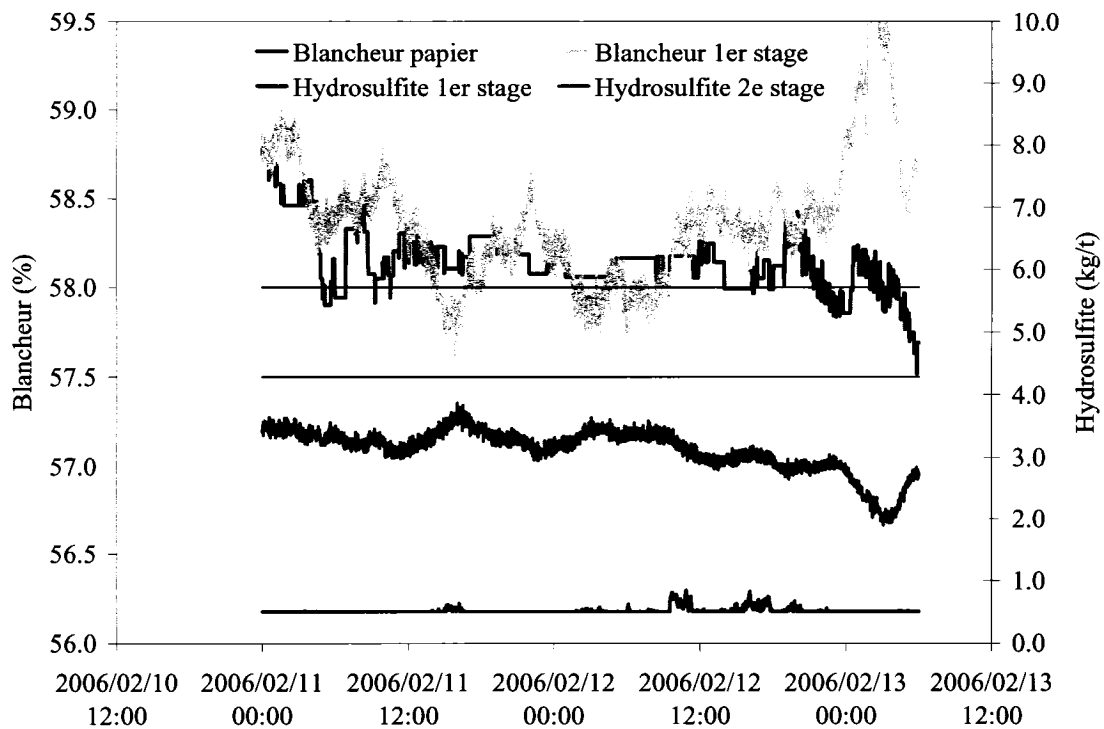


Figure 5.8 – Exemple où le contrôle du deuxième stage est en fonction (et pas le premier stage)

5.4.4 Effet de la stratégie de contrôle complète sur la variabilité de la blancheur finale

L'implantation de la stratégie de contrôle complète est illustrée à la Figure 5.9. La blancheur du premier stage est maintenue constante grâce à la manipulation de

l'hydrosulfite du premier stage. L'hydrosulfite du deuxième stage varie très lentement car la blancheur du premier stage est constante et il y a une lente action intégrale sur la blancheur du papier. Une perturbation fait en sorte que la blancheur chute sous sa limite inférieure. Une faible quantité d'hydrosulfite au troisième stage est utilisée jusqu'à ce que la blancheur soit au-dessus de la limite inférieure. La blancheur du papier augmente lentement par la suite grâce à l'augmentation de l'hydrosulfite du deuxième stage. Vers la fin de la Figure 5.9, une perturbation fait augmenter subitement la blancheur mais cette augmentation est de courte durée et elle n'a presque pas d'effet sur l'hydrosulfite du deuxième stage. Un autre exemple de la stratégie complète est illustré à la Figure 5.10, où l'hydrosulfite du 3^e stage n'était pas requis.

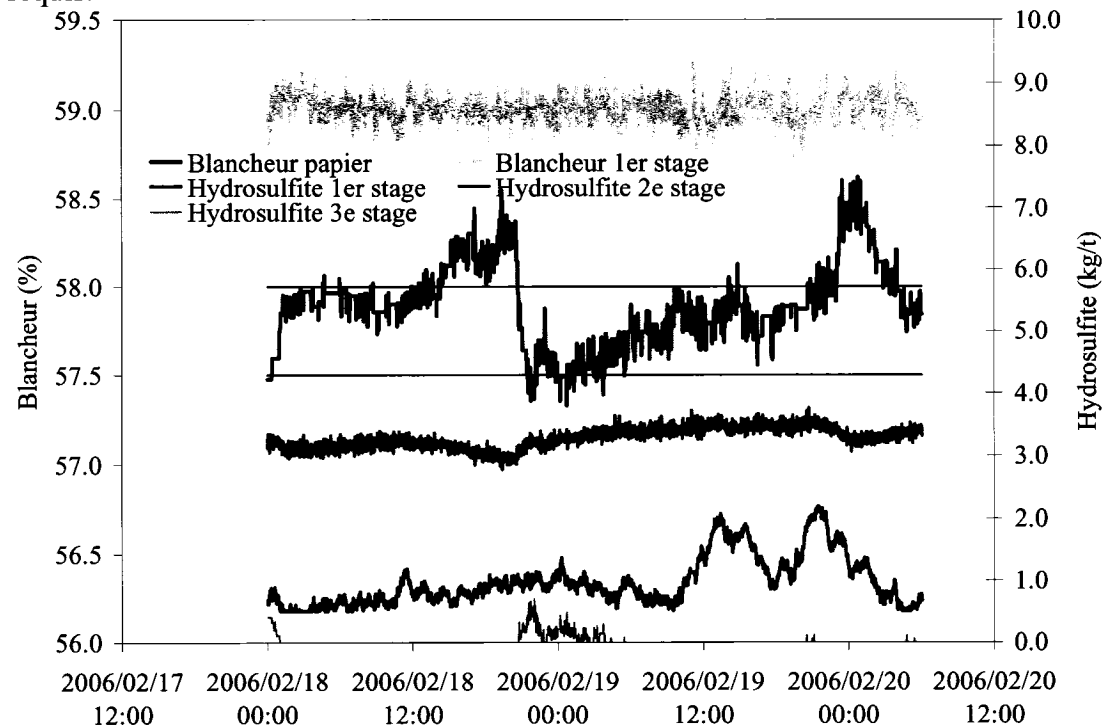


Figure 5.9 – Exemple de la stratégie de contrôle complète où l'hydrosulfite du troisième stage est requis

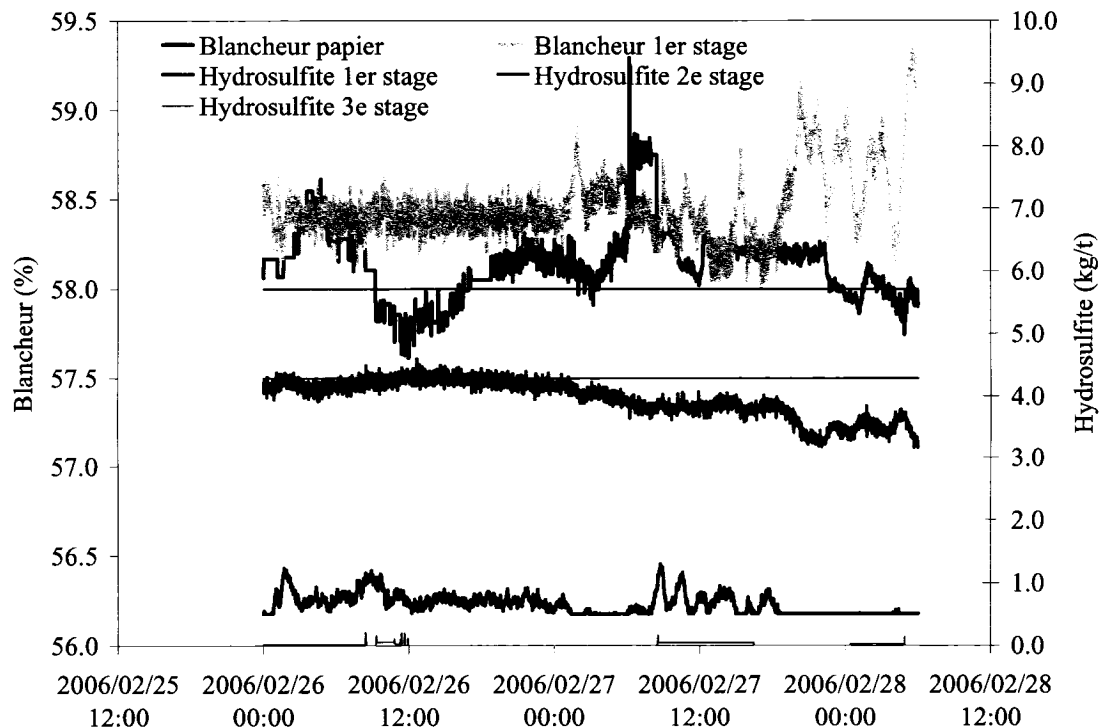


Figure 5.10 – Exemple de la stratégie de contrôle complète où l’hydrosulfite du troisième stage n’est pas requis, beaucoup de perturbations sur la blancheur finale

Enfin, un autre exemple de l’implantation de la stratégie de contrôle est illustré à la Figure 5.11. Tout comme dans le cas de la Figure 5.10, l’hydrosulfite du troisième stage n’est pas requis. Cependant, il y a beaucoup moins de perturbations sur la blancheur finale du papier. Les causes de ces perturbations ne sont pas encore bien comprises. Les Figures 5.10 et 5.11 servent donc à illustrer que la performance de la stratégie de contrôle dépend beaucoup des perturbations de blancheur du papier.

Il est également important de noter que la cible de blancheur pour le papier est passée de 58.8% à 58.0% depuis la mi-février 2006.

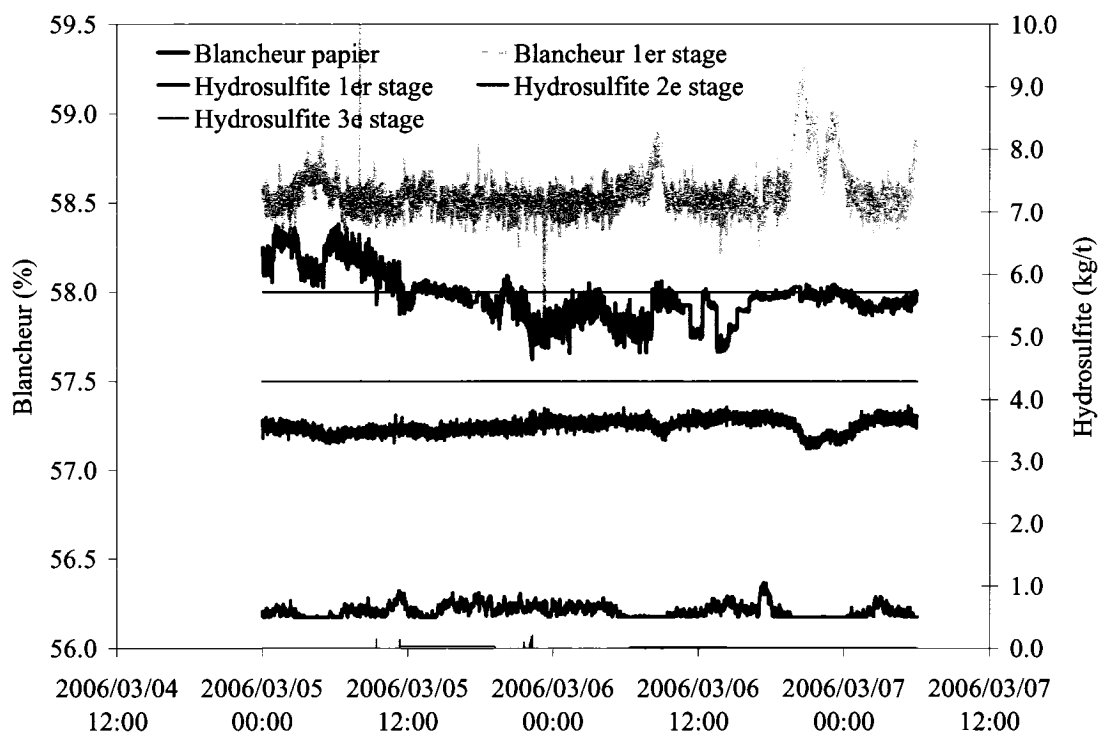


Figure 5.11 – Exemple de la stratégie de contrôle complète où l’hydrosulfite du troisième stage n’est pas requis, peu de perturbations sur la blancheur finale

Les mesures de performance pour les Figures 5.4 à 5.6 et 5.8 à 5.11 sont données dans le Tableau 5.2.

Tableau 5.2 – Mesures de performance pour l’implantation de la stratégie de contrôle

Número de figure	Cible blancheur papier	Moyenne blancheur papier	Écart type blancheur papier	ISE blancheur papier	Indice de Harris blancheur papier	Intégrale Consommation hydrosulfite	Consommation hydrosulfite par blancheur moy papier
5.4 Bon contrôle manuel	58.8	58.85	0.18	109	30.5	13760	234
5.5 Mauvais contrôle manuel	58.8	58.84	0.28	256	53.8	13063	222
5.6 Contrôle 1er stage seulement	58.8	59.11	0.14	59	10.3	22686	384
5.8 Contrôle 2e et 3e stage seulement	58.0	58.15	0.18	174	41.4	11800	203
5.9 Contrôle tous les 3 stages - 18 fév 06	58.0	57.90	0.23	210	30.4	13901	240
5.10. Contrôle tous les 3 stages - 26 fév 06	58.0	58.14	0.20	201	38.9	15008	258
5.11 Contrôle tous les 3 stages - 5 mar 06	58.0	57.98	0.14	65	20.7	13541	234

Le ISE est l'intégrale de l'erreur au carré de la blancheur moyennée aux minutes. (Le ISE pour le cas du contrôleur du premier stage seulement a été fait autour de la moyenne de la blancheur mesurée car le surblanchiment au deuxième stage n'est pas causé par la stratégie de contrôle.) L'indice de Harris est le rapport entre la variance de l'erreur de contrôle et la variance qui résulte de l'application d'un contrôleur à variance minimale (estimée avec les données de blancheur du papier sans retard selon Harris, 1989). Cet indice permet de déterminer si la boucle de contrôle est près de sa performance idéale, lorsque l'indice de Harris est égal à 1. Toutes les valeurs de l'indice de Harris sont élevées car, avec une bonne connaissance du retard du procédé, les paramètres de la boucle de contrôle principale au deuxième stage pourraient être modifiés pour assurer une meilleure performance.

Les mesures de performance révèlent que le contrôle de blancheur au premier stage réduit l'indice de Harris de la blancheur finale. En effet, sans dérive lente de procédé et sans risques de chutes de blancheur, il serait préférable de garder la blancheur du premier stage constante et l'hydrosulfite du deuxième stage constant. Les variations lentes d'hydrosulfite du deuxième stage en boucle fermée sont un mal nécessaire pour protéger la blancheur du papier des dérives lentes. Ceci est également illustré par le fait que dans tous les cas « avec contrôle », c'est le cas où le contrôleur 1 est saturé que l'indice de Harris de la blancheur est le plus élevé : il n'est pas suffisant que l'hydrosulfite du deuxième stage suive les variations de blancheur au premier stage.

Lors de la rédaction de ce mémoire, la stratégie de contrôle a été implantée depuis un peu plus d'un mois. Il n'est donc pas possible de commenter sur la performance à long terme de la stratégie de contrôle. La Figure 5.12 compare la blancheur du papier en février 2005 et en février 2006 tandis que le Tableau 5.3 compare la consommation d'hydrosulfite. Cette base de comparaison a été choisie en supposant que la blanchabilité des copeaux de février 2005 est semblable à celle de février 2006.

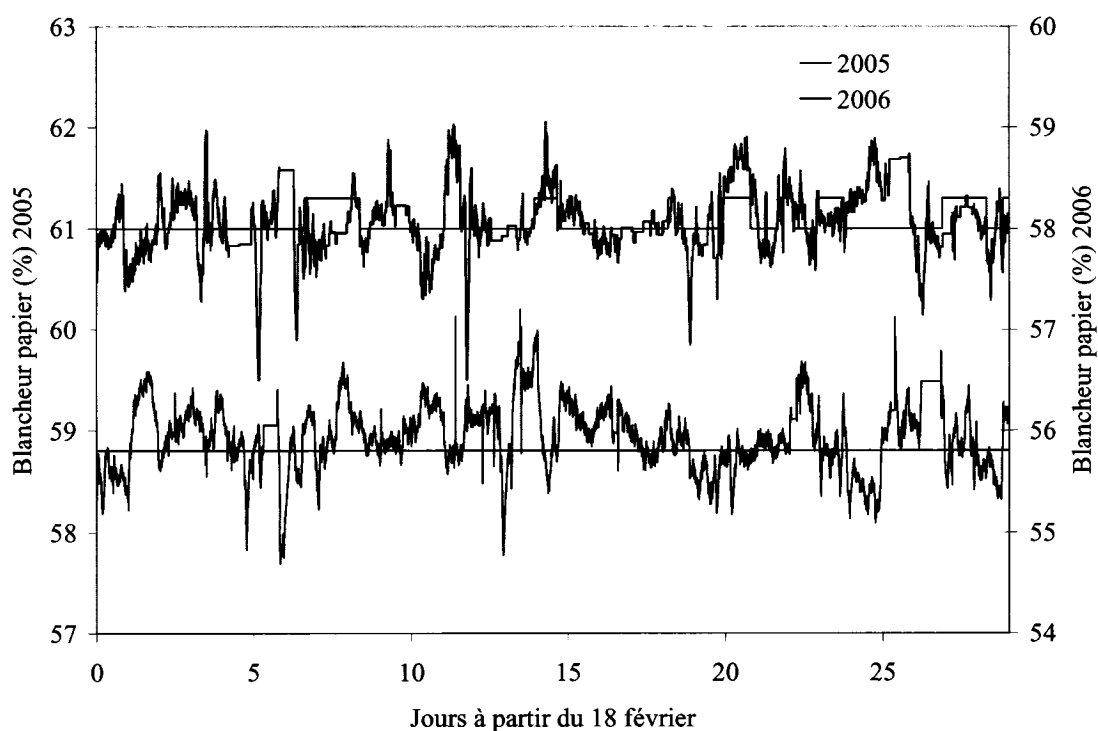


Figure 5.12 – Comparaison de la blancheur du papier en février 2005 (sans contrôle) avec février 2006 (avec contrôle)

Les résultats démontrent que la variabilité de blancheur du papier est légèrement réduite avec l'implantation de la stratégie de contrôle. Les résultats à long terme permettront de déterminer si cette petite réduction de variabilité est significative.

Tableau 5.3 – Comparaison de la variabilité de la blancheur et de la consommation d'hydrosulfite sans contrôle (2005) et avec contrôle (2006)

	2005 (sans contrôle)	2006 (avec contrôle)
Écart type blancheur finale	0.331	0.325
ISE blancheur finale	1075.5	884.2
Consommation totale hydrosulfite (kg brut)	401 165	410 876
Hydrosulfite 1 ^{er} stage (kg actif/tonnes produites)	0.85 (20% du total)	0.81 (18% du total)
Hydrosulfite 2e stage (kg actif/tonnes produites)	3.11 (75% du total)	3.52 (79% du total)
Hydrosulfite 3e stage (kg actif/tonnes produites)	0.20 (5% du total)	0.12 (3% du total)

La consommation d'hydrosulfite totale est plus élevée avec contrôle malgré la consigne de blancheur diminuée. Cette augmentation de la consommation d'hydrosulfite est causée par le fait que l'usine a accumulé des copeaux en février 2006 à cause d'une grève de scierie, ce qui rend les copeaux plus foncés. (L'hypothèse des copeaux semblables en février 2005 et 2006 n'est donc pas valide.) Il est intéressant de noter que la proportion de la consommation d'hydrosulfite au troisième stage est réduite et que la consommation d'hydrosulfite au deuxième stage est augmentée avec la stratégie, ce qui répond exactement aux objectifs de contrôle. Il est important de souligner que la variabilité de la blancheur n'est pas compromise en manipulant le deuxième stage, même lorsque moins d'hydrosulfite est utilisé au troisième stage. Les comparaisons à plus long terme permettront de quantifier les économies d'hydrosulfite, surtout lors de deux périodes où il n'y a pas eu de situation exceptionnelle d'accumulation de copeaux.

5.5 AJOUTS À LA STRATÉGIE DE CONTRÔLE

Tel que discuté dans la Section 5.1, il y a deux désavantages importants reliés à la stratégie de contrôle proposée. Premièrement, une grande partie de la stratégie repose sur la mesure de la sonde de blancheur au premier stage. Deuxièmement, le gain du troisième stage varie et peut même être négatif. Des ajouts à la stratégie de contrôle pour minimiser l'impact de ces problèmes sont suggérés dans cette section.

5.5.1 Premier stage : détection de dérive de sonde de blancheur

La sonde de blancheur située en aval du premier stage se trouve parfois en situation de dérive. À première vue, ce problème n'est pas toujours évident car la blancheur du premier stage est maintenue à son point de consigne grâce au contrôleur 1. Un exemple de dérive de sonde est illustré à la Figure 5.13. La blancheur du premier stage est maintenue constante grâce aux variations d'hydrosulfite du premier stage. Pendant l'après-midi du 15 juillet 2005, la demande d'hydrosulfite se met à augmenter jusqu'à ce que l'hydrosulfite atteigne sa limite. Une fois l'hydrosulfite saturé, la blancheur se met à chuter. Il est donc très probable que la sonde de blancheur était en dérive depuis le début du 16 juillet 2005. Ce problème de dérive de sonde a fait en sorte qu'une grande quantité d'hydrosulfite a été inutilement injectée au premier stage.

Une deuxième sonde de blancheur va être installée à l'entrée du deuxième stage. Il est donc question de proposer une stratégie de détection de dérive avec les deux sondes de

blancheur. Les deux sondes de blancheur sont identiques et l'hypothèse de départ est qu'une seule sonde peut être en dérive à la fois.

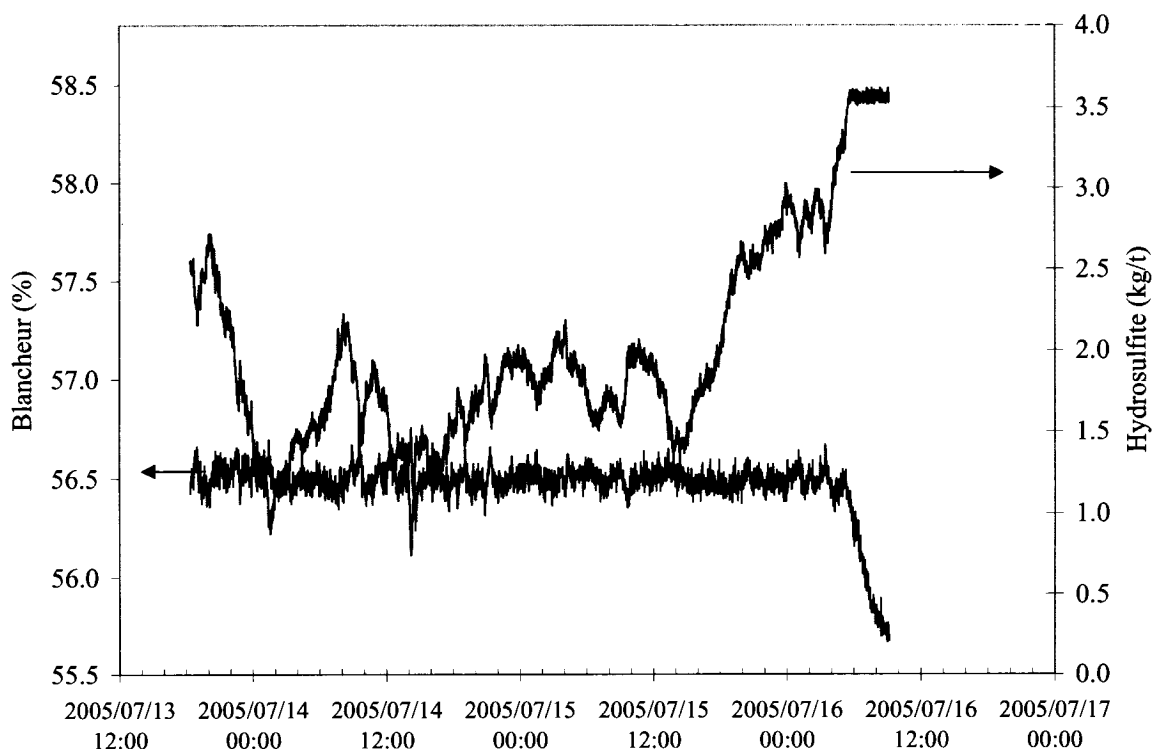


Figure 5.13 – Exemple de la dérive de la sonde de blancheur du premier stage lorsque le contrôleur 1 est en fonction

5.5.1.1 Algorithme proposé

Dans le texte de la Section 5.5.1, « *B1* » est utilisé pour désigner la sonde de blancheur qui est utilisée pour le contrôle de blancheur au premier stage. « *B2* » est utilisé pour désigner la deuxième sonde de blancheur qui sera installée en série avec la sonde *B1*. La sonde *B2* n'est pas utilisée en boucle fermée avec l'hydrosulfite, contrairement à la sonde *B1*. Dans le cas où le signal *B1* est stable et que, par exemple, le signal de *B2* se dirige vers le bas, il ne s'agit pas nécessairement de la sonde *B2* qui est en dérive. Il y

a deux possibilités : soit que la sonde $B1$ est en dérive et que la chute du signal $B2$ indique vraiment l'état de la blancheur de la pâte ou soit que la sonde $B2$ est en dérive et que la blancheur de la pâte du premier stage est véritablement maintenue à son point de consigne. Il faut une troisième information pour identifier l'instrument qui est en dérive.

À l'instar de la détection intuitive de la dérive de $B1$ à partir de l'augmentation de la consommation d'hydrosulfite (Figure 5.13), la troisième information est $B3$, qui est une blancheur estimée de la quantité d'hydrosulfite injectée au premier stage. L'équation proposée pour $B3$ est

$$B3 = 54.5 + 4.5(1 - \exp(-H1)) \quad (5.9)$$

où $H1$ est le dosage d'hydrosulfite (kg/t) injecté au premier stage. L'Équation 5.9 est aucunement précise et ne doit pas être utilisée dans un modèle. L'Équation 5.9 indique tout simplement un ordre de grandeur possible pour la blancheur du premier stage avec une forme qui commence à être non-linéaire vers 4 kg/t. Surtout, l'Équation 5.9 permet de suivre les augmentations de $B1$ ou $B2$ avec les augmentations de $B3$. Il y a donc beaucoup plus d'incertitude associée à la valeur $B3$ qu'aux valeurs $B1$ et $B2$. De plus, il est important d'assurer la cohérence dynamique de $B1$, $B2$ et $B3$. Ceci peut être fait en filtrant $B3$ à travers la dynamique du réservoir de transfert et du réservoir de latence et en filtrant $B1$ à travers la dynamique du réservoir de latence (voir Tableau 4.5). Les valeurs de $B1$, $B2$ et $B3$ sont moyennées

avec une moyenne mobile d'une heure afin de détecter une dérive et non une seule mesure anormale.

Le test de détection proposé est le test du maximum de vraisemblance généralisé, tel que décrit par Narasimhan et Jordache (2000) et adapté par Antoine Berton.

Le vecteur de mesure est y (1 x 3)

$$y = [B1 \ B2 \ B3] \quad (5.10)$$

qui a une variance V_y (3 x 3), en supposant que les covariances sont nulles

$$V_y = \begin{bmatrix} V_1 & 0 & 0 \\ 0 & V_2 & 0 \\ 0 & 0 & V_3 \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

Les mesures $B1$, $B2$ et $B3$ doivent être égales, donc

$$Ay^T = 0 \quad (5.12)$$

où

$$A = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (5.13)$$

Le vecteur de résidu r (2 x 1) est obtenu de l'Équation 5.12 et sa matrice de variance

V_r (2 x 2) est donnée par

$$V_r = A V_y A^T \quad (5.14)$$

En temps normal, la variable J (1 x 1) exprimée par l'Équation 5.15 ci-dessous doit suivre une distribution chi carrée à deux degrés de liberté (car la dimension de r et le degré de redondance sont de 2)

$$J = r^T V_r^{-1} r \quad (5.15)$$

L'Équation 5.12 n'est pas satisfaite lorsque la valeur du critère 5.15 dépasse le seuil prescrit par la distribution chi carrée au degré de confiance choisi. Il y a donc une dérive parmi $B1$, $B2$ et $B3$ et il faut identifier lequel est en faute. Pour ce faire, il faut évaluer la variable t_i (1 x 1) pour chaque B_i .

$$t_i = \frac{[(A_i)^T V_r^{-1} r]^2}{(A_i)^T V_r^{-1} A_i} \quad (5.16)$$

où A_i est la $i^{\text{ème}}$ colonne de la matrice A .

L'instrument qui a la plus grande valeur de t_i est celui qui contribue à la panne détectée par la variable J .

Les paramètres qui peuvent être manipulés pour modifier la sensibilité du test sont la durée de la moyenne mobile et la valeur des variances dans la matrice V_y . Les valeurs de V_1 , V_2 et V_3 doivent être choisies telles que la variable J suit une distribution chi carrée lorsqu'il n'y a pas de dérive. Dans cette application, $V_1 = V_2 = 0.001$ et $V_3 = 0.1$.

5.5.1.2 Résultats de simulation

Comme la sonde $B2$ n'est pas encore installée, un signal $B2$ a été généré, inspiré du contenu fréquentiel de $B1$, afin d'étudier les capacités de l'algorithme de détection de sonde proposé. Dans les trois figures qui suivent (5.14 à 5.16), il est évident que les variations de $B3$ sont beaucoup plus grandes que les variations de $B1$ et $B2$. Ceci est

normal car l'hydrosulfite du premier stage varie en boucle fermée afin de maintenir la blancheur du premier stage à sa consigne. Cette différence dans l'amplitude de $B1$ et $B2$ par rapport à $B3$ illustre bien que ce dernier doit lui être accordé moins de confiance.

Le premier cas (Figure 5.14) illustre une dérive de $B1$ à partir de $t = 1300$ minutes jusqu'à $t = 1700$ minutes. Vu que $B2$ et $B3$ augmentent aussi à cause de la dérive de $B1$, cette dernière est isolée comme étant en dérive à partir du temps $t = 1430$. Le seuil de la variable J est de 5.99 à une confiance de 95%. La variable J (de l'Équation 5.18) retombe sous le seuil de détection une fois la dérive terminée.

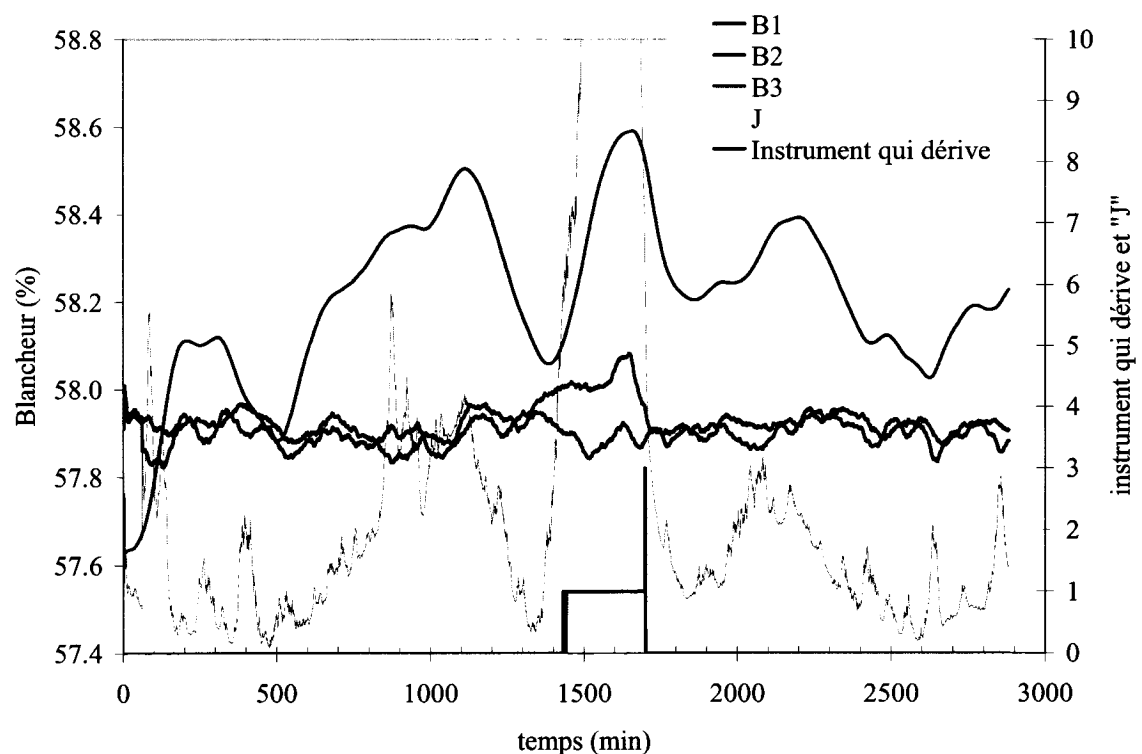


Figure 5.14 - Exemple d'une dérive de la sonde B1 à partir de 1300 minutes

Le deuxième cas (Figure 5.15) illustre l'importance de la confiance moins élevée accordée à $B3$. Le signal de $B3$ de la Figure 5.15 est le même que celui de la Figure 5.14 mais il n'y a pas d'augmentation de $B2$. La valeur de $B3$ est la seule à augmenter et cette augmentation n'est pas suffisante pour sonner l'alarme. Du point de vue du procédé, ceci s'interprète comme étant une variation légitime de la consommation d'hydrosulfite en boucle fermée.

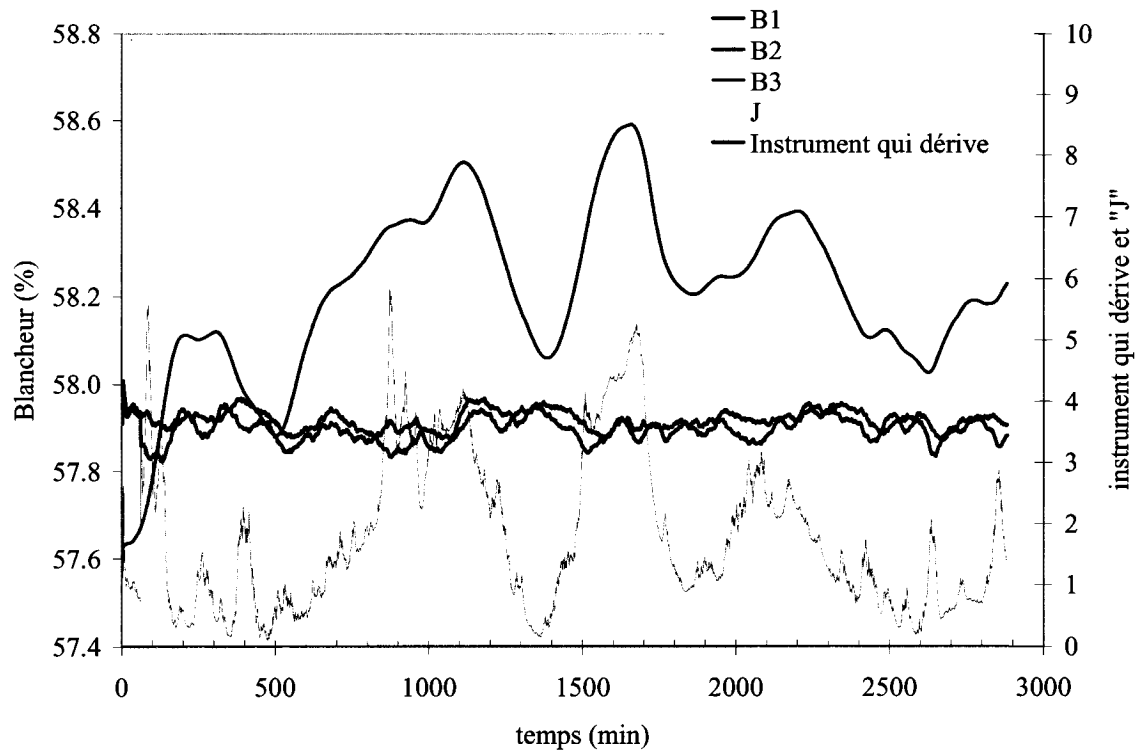


Figure 5.15 - Exemple d'aucune dérive, même tendance de $B3$ que dans la Figure 5.14

Le dernier cas (Figure 5.16) illustre une très grande augmentation de $B3$ qui est détectée comme une panne de $B3$. Dans le contexte du procédé, ceci peut être interprété comme une erreur dans le modèle qui calcule $B3$ car les sondes $B1$ et $B2$ donnent la même lecture. Une telle alarme de courte durée peut être ignorée mais une alarme qui persiste nécessiterait une réévaluation de l'équation de $B3$, surtout en ce qui a trait à la blancheur initiale.

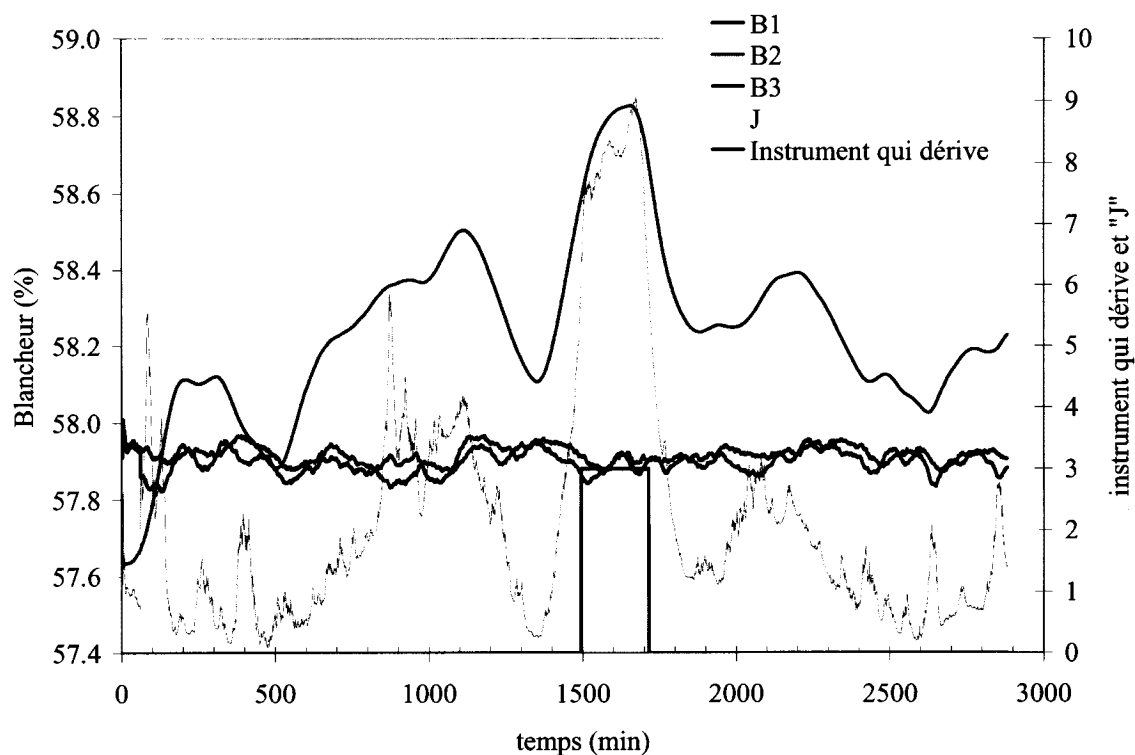


Figure 5.16 - Exemple d'une dérive du modèle $B3$ à partir du temps 1300 minutes

Les trois exemples de simulation ci-dessus démontrent qu'il est possible d'identifier laquelle des deux sondes est en dérive en utilisant l'information de l'hydrosulfite

consommé. Une alarme sur un des instruments exigerait donc la vérification de l'instrument fautif.

5.5.2 Troisième stage : détection de changement de signe du gain

Les résultats de laboratoire des Sections 4.2 et 4.3 suggèrent que le gain du troisième stage est variable et qu'il peut même devenir négatif. Un tel comportement est parfois observé en usine, tel que démontré dans la Figure 5.17, où l'hydrosulfite du 3^e stage est coupé à zéro vers 7:20 et la blancheur du papier se met à augmenter graduellement.

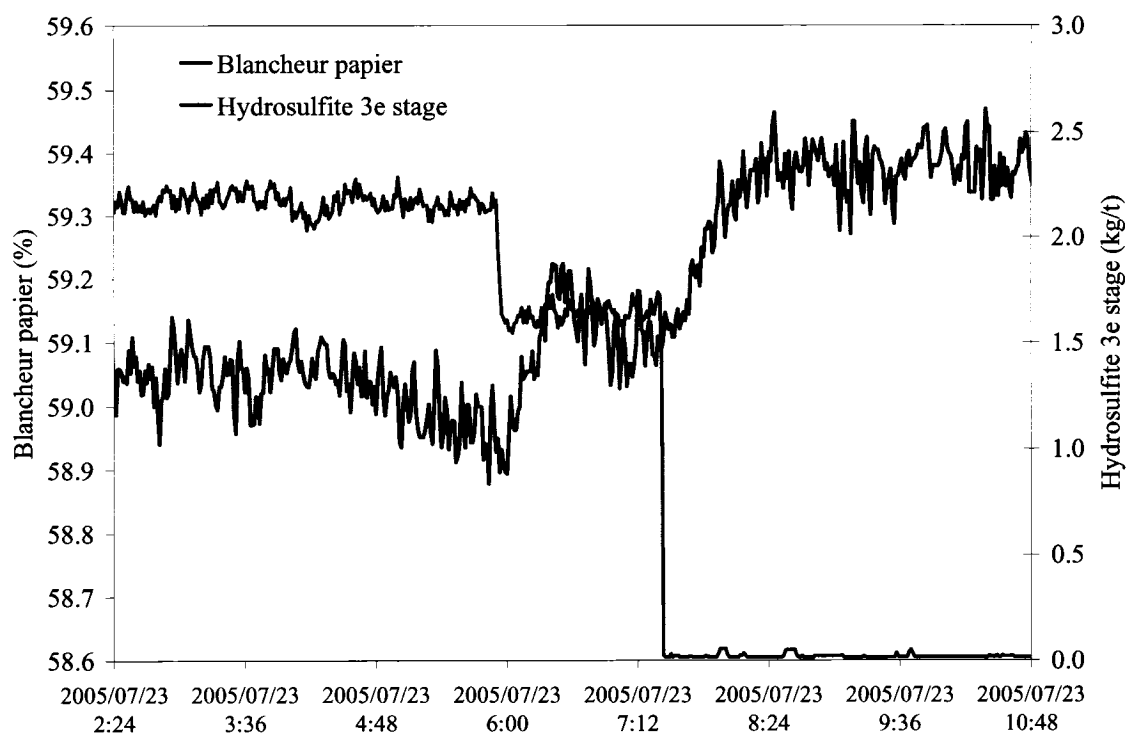


Figure 5.17 – Exemple d'un gain négatif au troisième stage de blanchiment

La détection du changement de signe du gain devient alors très importante car la stratégie de contrôle suggérée à la Section 5.1 se fie sur l'utilisation de l'hydrosulfite du troisième stage pour rattraper les pertes de blancheur.

Il est important de remarquer que l'exemple de la Figure 5.17 a lieu alors que la blancheur du papier est élevée (supérieure à sa consigne de 58.8%). Avec la stratégie de contrôle proposée à la Section 5.1, l'hydrosulfite du troisième stage n'aurait même pas été utilisé dans le cas de la Figure 5.17. Il a été proposé que le gain de blancheur du 3^e stage est négatif pendant les périodes de haute blancheur mais il n'y a pas assez d'information pour savoir si les changements de signe du gain peuvent avoir lieu lorsque la blancheur est basse.

5.5.2.1 Algorithme proposé

L'algorithme proposé pour la détection de changement de signe du gain du 3^e stage est le Model Weighting Adaptive Control (aussi connu sous MWAC) présenté dans Gendron *et al* (1993). Cet algorithme a été choisi car il est facilement implantable en usine à cause de la simplicité de ses calculs. Il permet d'identifier le gain et le retard d'un procédé afin que cette information soit utilisée par un contrôleur qui pourrait, par exemple, être un contrôleur par réglage lambda. La constante de temps n'est pas estimée dans cet algorithme. Dans le contexte de la stratégie de contrôle proposée, l'estimation du gain est plutôt d'intérêt car il n'est pas question de contrôler le procédé avec un gain négatif. L'estimation du retard a peu d'importance dans cette application.

La description qui suit ne sert qu'à donner les grandes lignes de l'algorithme. Une description complète de l'algorithme est donnée dans Gendron (1997).

Afin d'utiliser l'algorithme MWAC, il faut identifier un intervalle possible pour le gain et le retard du procédé car l'algorithme utilise un ensemble discret de modèles. Une grille de $i \times j$ modèles utilisant i gains et j retards est ainsi créée et la somme pondérée la plus probable des modèles proposés est ainsi retenue à chaque itération.

La somme pondérée des modèles s'effectue ainsi : pour chaque modèle possible, l'erreur entre la sortie du procédé et la sortie calculée par le modèle et l'entrée du procédé est évaluée. Cette erreur est ensuite filtrée par un facteur d'oubli et l'erreur du modèle de l'itération précédente. Un poids inversement proportionnel à l'erreur est ensuite assigné à chaque modèle. À chaque itération, une grille de même dimension que la grille de gains et de retards possibles est peuplée de poids. L'aplatissement (ou « flatness ») de cette grille (désigné par la variable W) est calculée par la somme de la racine carrée de chaque poids. La variable W est bornée entre 1 (un modèle parfait été identifié) et la racine carrée de $i \times j$. (tous les modèles sont également plausibles) Les paramètres du modèle sont mis à jour si la valeur de W est inférieure à la valeur de W de l'itération précédente. Le gain et le retard identifiés par l'algorithme proviennent de la somme pondérée des poids.

Il est toutefois possible que la dynamique du procédé change mais que la basse valeur de W maintienne les paramètres estimés à des valeurs qui ne reflètent plus la nouvelle

réalité du procédé. Afin d'éviter ceci, la valeur de W est lentement filtrée vers le haut si elle ne remplace pas la valeur de W de l'itération précédente.

À l'instar de tout algorithme d'adaptation, il faut une excitation suffisante pour identifier le modèle qui correspond le plus au procédé. En d'autres mots, tous les modèles sont possibles lorsque l'entrée et la sortie du procédé ne varient pas.

5.5.2.2 Résultats de simulation

L'algorithme MWAC a été programmé et utilisé sur les données de la Figure 5.17 (moyennes de 6 minutes). Les résultats sont illustrés à la Figure 5.18. Initialement, l'entrée et la sortie du procédé restent constants donc l'estimé du gain reste à la valeur intermédiaire de la grille, soit 0.25 % t/kg. Le deuxième échelon vers le bas (vers 7 :20) fournit suffisamment d'information pour que le gain estimé soit négatif.

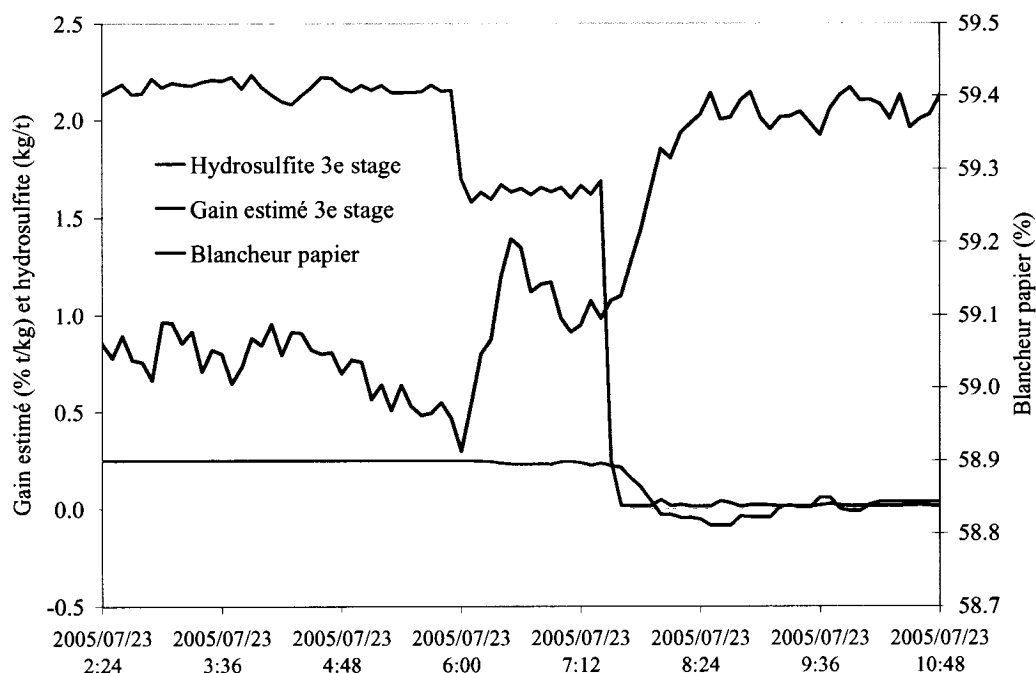


Figure 5.18 – Gain du troisième estimé par l'algorithme MWAC sur les données de la Figure 5.17.

Il est pertinent d'identifier quand le gain du troisième stage devient négatif mais il est d'autant plus pertinent d'identifier quand il redevient positif. Les exemples qui suivent illustrent les difficultés associées à l'identification du gain quand il redevient positif. Les exemples des Figures 5.19 et 5.20 démontrent l'utilisation complète de l'algorithme MWAC, c'est-à-dire avec un contrôleur en boucle fermée qui utilise le gain du procédé en réglage λ .

Dans le cas de la Figure 5.19, l'hydrosulfite du troisième stage est retourné à sa valeur nominale aussitôt qu'un gain négatif est détecté. Le contrôle en boucle fermée est réactivé une fois que le gain est détecté comme étant positif. Cette détection du gain positif peut avoir lieu grâce au filtrage vers le haut de la valeur de W , permettant ainsi le retour graduel du modèle estimé au centre de la grille de gains et de retards. Le pic d'hydrosulfite une fois que le contrôleur est remis en fonction est causé par la petite valeur du gain estimée par l'algorithme.

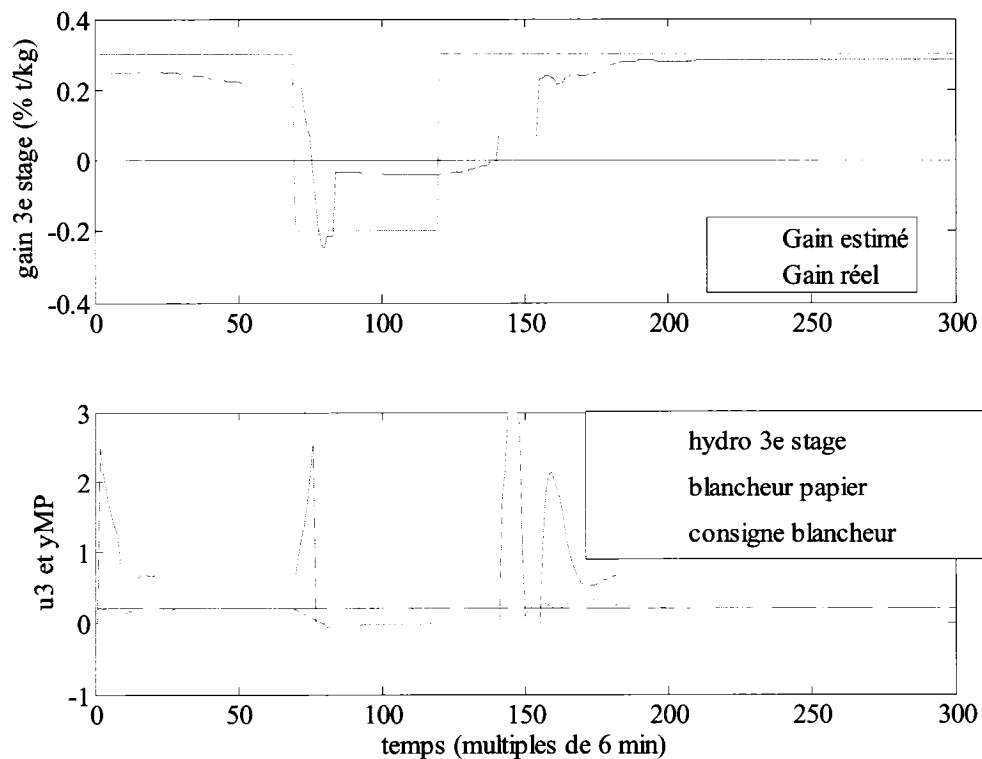


Figure 5.19 – Détection du changement de signe du gain du procédé : variable manipulée forcée à zéro lorsque le gain est détecté comme étant négatif. (Hydrosulfite du 3^e stage et blancheur du papier présentés en variables d'écart.)

La détection du temps où le gain du troisième stage redevient positif peut être accéléré en excitant le système en périodes de gain négatif. Tel qu'illustré à la Figure 5.20, l'hydrosulfite du troisième stage varie en sinus (amplitude : 0.2 kg/t) en période de gain négatif. Ceci fait en sorte que l'estimé du gain donne parfois un faux positif, ce qui cause des petites augmentations d'hydrosulfite. Cependant, le changement du système à un gain positif véritable est détecté beaucoup plus rapidement. Dans l'exemple des Figures 5.19 et 5.20, il faut environ 120 minutes pour détecter que le

gain est redevenu positif sans excitation et il ne faut que 18 minutes pour la détection avec excitation.

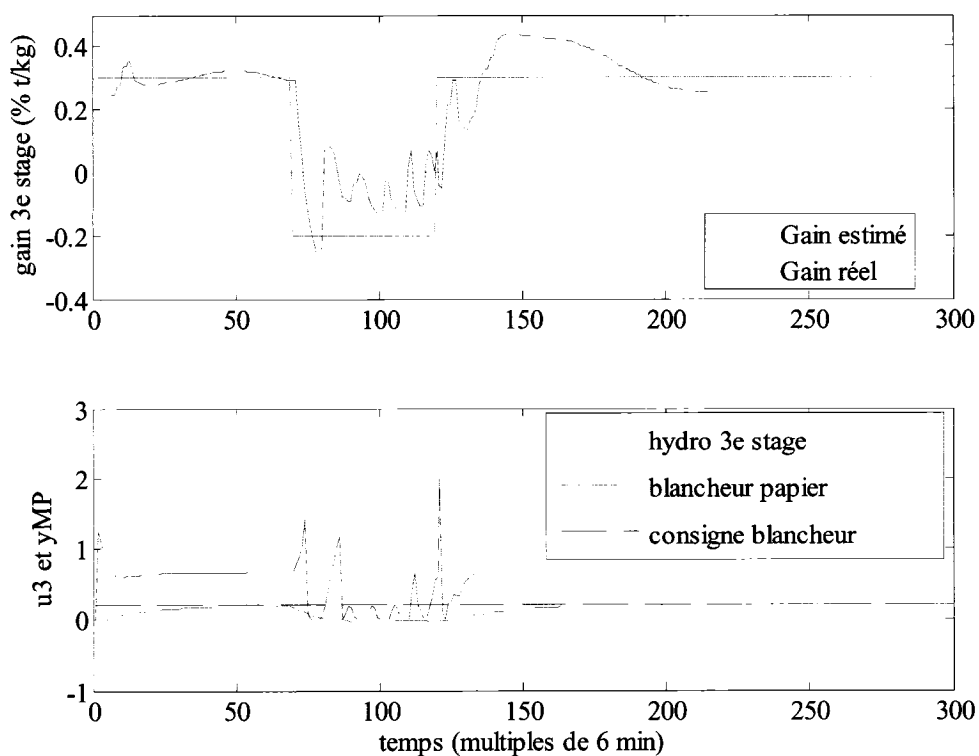


Figure 5.20 – Détection du changement de signe du gain du procédé avec excitation : variable manipulée forcée à zéro lorsque le gain est détecté comme étant négatif. (Hydrosulfite du 3^e stage et blancheur du papier présentés en variables d'écart.)

Le but de cette section n'est pas d'offrir une étude approfondie sur l'estimation de paramètres ni sur le contrôle adaptatif. Le propos consiste simplement à montrer que l'information entrée/sortie du troisième stage peut être utilisée pour estimer le gain du procédé avec une méthode qui est facile à implanter en usine. De plus, ce n'est pas

que la détection du gain négatif qui est importante, le suivi à long terme du gain du troisième stage peut justifier la modification des paramètres du contrôleur 3.

5.6 CONCLUSIONS SUR LE DÉVELOPPEMENT D'UNE STRATÉGIE DE CONTRÔLE

Une stratégie de contrôle pour maintenir la blancheur à sa consigne a été proposée. Cette stratégie a comme variables manipulées l'hydrosulfite du premier et du deuxième stage. L'hydrosulfite du troisième stage est utilisé seulement en cas de pertes importantes de blancheur, ce qui assure la minimisation de l'utilisation de l'hydrosulfite au troisième stage. Les résultats de simulation démontrent que la blancheur peut être maintenue à sa consigne par une telle stratégie mais que plusieurs perturbations de blancheur ne seront jamais rejetées par l'hydrosulfite du deuxième stage. Une simulation a également démontré que des résultats semblables peuvent être obtenus par commande prédictive.

L'implantation en usine de la stratégie de contrôle rencontre les objectifs visés. La variabilité de la blancheur du papier est réduite mais la consommation d'hydrosulfite au deuxième est augmentée selon les résultats de l'implantation d'une durée d'un mois. Un suivi à long terme de la performance de la stratégie de contrôle sera nécessaire, surtout pour quantifier les économies d'hydrosulfite.

Deux ajouts à la stratégie de contrôle ont été proposés : un algorithme de détection de dérive de sonde de blancheur pour le premier stage et un algorithme d'estimation du

gain pour le troisième stage. Ces deux ajouts rencontrent leurs objectifs en simulation et ils seront implantés en usine si les problèmes qu'ils visent à régler persistent.

CHAPITRE 6 : CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

6.1 MÉTHODOLOGIE POUR DÉVELOPPER UNE STRATÉGIE DE CONTRÔLE POUR UN PROCÉDÉ MULTI-ÉTAGÉ

Une stratégie de contrôle pour une application industrielle d'un procédé multi-étagé a été développée. La stratégie résultante permet de contrôler la blancheur du papier dans un procédé de blanchiment à l'hydrosulfite tout en minimisant l'utilisation du stage moins efficace. Bien que cette stratégie soit spécifiquement adaptée pour le procédé en question, il est possible d'en tirer une méthodologie pour le développement d'une stratégie de contrôle d'un procédé multi-étagé.

La méthodologie développée est la suivante. Premièrement, il faut déterminer les gains statiques de chaque stage par une planification statistique d'expérience qui permet d'estimer la contribution de chaque stage à la qualité finale du produit. Dans le cas de cette application industrielle, il a été confirmé que la blancheur en fonction de l'hydrosulfite dépend de la blancheur du stage précédent et que le troisième stage est moins efficace que les deux autres.

Deuxièmement, il faut déterminer la fréquence des variations des gains statiques. Dans le cas du procédé à l'étude, le gain du deuxième stage est fortement réduit lors de périodes d'accumulation de copeaux de bois. Il faut ensuite étudier la dynamique

du procédé et la cinétique de réaction si nécessaire. Pour le procédé de blanchiment à l'hydrosulfite, de simples tests échelons ont permis de déterminer les régimes d'écoulement dans les différents réservoirs de pâte.

L'information sur les gains statiques et sur la dynamique du procédé peut être utilisée pour élaborer un modèle du procédé. La comparaison de la sortie du modèle et de l'application industrielle permet l'étude des perturbations qui ne peuvent être expliquées par les variables manipulées de la future stratégie de contrôle.

Enfin, une stratégie de contrôle est élaborée à partir du modèle dynamique. Dans le cas du procédé de blanchiment, les deux mesures de blancheur disponibles ont été utilisées pour contrôler les trois stages de blanchiment. Des essais en simulation doivent être effectués avant l'implantation en usine.

6.2 CONTRIBUTIONS AUX CONNAISSANCES DU BLANCHIMENT À L'HYDROSULFITE

Ce projet de contrôle de procédé a permis une contribution aux connaissances du blanchiment à l'hydrosulfite. Tel que discuté au Chapitre 3, la littérature du blanchiment à l'hydrosulfite ne fournit pas l'information nécessaire pour modéliser, et encore moins contrôler, un procédé de blanchiment multi-étagé. L'investigation du procédé du Chapitre 4 a démontré que le procédé peut être un procédé qui a une mémoire, c'est-à-dire qu'une pâte difficile à blanchir dans un stage donné peut être difficile à blanchir dans le stage suivant. De tels résultats ne sont pas présents dans la

littérature du blanchiment et ils constituent une contribution aux connaissances du blanchiment à l'hydrosulfite.

6.3 RÉSULTATS DE LA STRATÉGIE DE CONTRÔLE

Suite à l'étude du procédé, une stratégie de contrôle simple a été proposée et implantée avec succès en usine. Cette stratégie maintient la blancheur du papier aux environs de sa cible et utilise l'hydrosulfite du stage moins efficace seulement en cas de chutes de blancheur. La variabilité de la blancheur du papier est réduite ainsi que la consommation d'hydrosulfite au troisième stage. Cette utilisation du troisième stage moins efficace en cas d'urgence fait en sorte que plusieurs perturbations de blancheur ne seront jamais rejetées. Il s'agit du compromis inévitable de la stratégie de contrôle : en minimisant l'utilisation du dernier stage et en ne connaissant pas la durée du délai le plus important du procédé, il faut accepter que la blancheur du papier contienne encore des variations importantes. Cependant, cette stratégie de contrôle empêche les cas de surblanchiment qui durent plusieurs jours.

6.4 RECOMMANDATIONS

Au moment de la rédaction de ce mémoire, la stratégie de contrôle était déjà en opération depuis quelques semaines. Il va sans dire qu'un suivi à long terme de la stratégie de contrôle est recommandé. Ce suivi permettra de modifier les paramètres des contrôleurs s'il y a un besoin de rendre la stratégie plus ou moins rapide. Ce suivi permettra également de quantifier les économies d'hydrosulfite.

Le suivi de la sonde de blancheur du premier stage est essentiel au bon fonctionnement à long terme de la stratégie de contrôle. L'utilisation d'une deuxième sonde de blancheur et d'une stratégie de détection de dérive, telle que celle suggérée à la Section 5.5.1, permettrait d'identifier rapidement les dérives d'une sonde ou l'autre.

Il est recommandé d'utiliser un algorithme d'optimisation pour déterminer la consigne de blancheur optimale après le premier stage. Avec la stratégie actuelle, la consigne de blancheur du premier stage est choisie par l'opérateur mais il doit sûrement y avoir une consigne de blancheur du premier stage qui minimise la consommation totale d'hydrosulfite. Il est également possible que cette consigne change dans le temps selon la qualité des copeaux. Un algorithme d'optimisation dynamique qui ne requiert pas de modèle du procédé devrait être utilisé. Un exemple d'un tel algorithme serait la recherche adaptative d'extremum.

Les résultats ont également démontré que la performance de la stratégie de contrôle dépend beaucoup des perturbations sur la blancheur du papier. Une fois que la blancheur du papier est bien contrôlée, il serait utile d'effectuer une étude approfondie afin de déterminer quels facteurs contribuent aux perturbations de blancheur.

RÉFÉRENCES

- BECKA, L. 1973. "Die Holzschliffbleiche mit Dithionit". *Zellstoff und Papier*. 22:12. 363-367.
- BEQUETTE, B.W. 2003. *Process Control: Modeling, Design, and Simulation*. Upper Saddle River NJ : Prentice Hall.
- BOGOMOLOVA, O. 2005. *Model Predictive Control and Extremum Seeking for a Hydrosulphite Brightening Process*. projet de fin d'études. École Polytechnique de Montréal.
- BOND, L.D., SWEENEY, N., GIUST, W., FLUET, A., FAIRBANK, M.G., WHITING, P. 1991. "Controlling Thiosulphate Resulting from Hydrosulphite Brightening of Mechanical Pulps". *Journal of Pulp and Paper Science*. 17:2. 30-33.
- BOX, G.E.P., DRAPER, N.R. 1987. *Empirical Model Building and Response Surfaces*. Toronto : John Wiley & Sons Canada Ltd.
- BROGDON, B.N., DIMMEL, D.R., MCDONOUGH, T.J. 2001. "Bleachability of kraft pulps treated by ethanol-based chlorine dioxide delignification sequences". *Journal of Wood Chemistry and Technology*. 21:3. 299-312.
- CRAWFORD, I.A. 1969. "The brightening of refiner groundwood from pinus radiata thinnings". *Appita*. 23:3. 177-186.
- DUMONT, G., VAN FLEET, R., STEWART, G. 2004. "A setpoint generation tool for optimal distribution of chemical load between bleaching stages". *Control Systems 2004 Conference, 14-18 juin 2004*. Québec, QC. 95-97.

- ELLIS, M. E. 1996. "Hydrosulfite (Dithionite) Bleaching". *Pulp Bleaching, Principles and Practice*. Sous la direction de C.W. Dence et D.W. Reeve. Atlanta : Tappi.
- FLUET, A., DUMONT, I., BELIVEAU, D. 1994. "Sodium hydrosulphite brightening. Laboratory versus mill results". *Pulp & Paper Canada*. 95:8. 37-40.
- GENDRON, S. 1998. *Model Weighting Adaptive Control*. PhD thesis p. McGill University.
- GENDRON, S., PERRIER, M., BARRETTE, J., AMJAD, M., HOLKO, A., LEGAULT, N. 1993. "Deterministic adaptive control of SISO processes using model weighting adaptation". *International Journal of Control*. 58:5. 1105-1123.
- GOUGH, B., KAY, J., KOVAC, S., HOLMES, S., LEBLANC, J., DEOBALD, B. 2002. "Advanced control of steam header pressure and reel brightness". *Pulp and Paper Canada*. 103:1. 54-56.
- GUPTA, V.N., MUTTON, D.B. 1969. "Use of sequestering agents in deionization and hydrosulphite bleaching of groundwood". *Pulp and Paper Magazine of Canada*. June 6:77-84.
- HARRIS, T.J. 1989. "Assessment of Control Loop Performance". *Canadian Journal of Chemical Engineering*. 67:Oct. 856-861.
- INGRUBER, O.V., KOPANIDIS, J. 1967. "Hydrosulphite Bleaching Part I. Decomposition of Hydrosulphite (Dithionite) Solutions with and without pulp". *Pulp and Paper Magazine of Canada*. 68:6. 258-267.
- JOYCE, P., MACKIE, D.M. "Brightening of Mechanical Pulps". 1979. 1979 *International Pulp Bleaching Conference*. 11-14 juin 1979. Toronto, ON. 107-118.

- LORAS, V., 1974. "Bleachability of mechanical pulp". *Tappi Journal*. 57:2. 98-102.
- LORAS, V. 1976. "Brightening of thermomechanical pulp". *Tappi Journal*. 59:11. 99-101.
- LORAS, V. 1980. "Bleaching". *Pulp and Paper: Chemistry and Chemical Technology Volume 1*. Sous la direction de J.P. Casey. Toronto : John Wiley and Sons.
- MCARTHUR, D.M., WILLOUGHBY A. E., BALDWIN S. H, WHITING P. 1988. "Medium consistency hydrosulphite brightening of mechanical pulp". *Paperi Ja Puu*. 70:6. 528-533.
- MCDONOUGH, T.J., RAWAT, N., KRISHNAGOPALAN, G.A. 2004. "A highly predictive steady-state model of the D(EO)DED kraft pulp bleaching sequence". *Appita Journal*. Sept:381-385.
- MELZER, J. 1985. "Kinetics of bleaching mechanical pulps by sodium dithionite.". *1985 International Pulp Bleaching Conference*. Québec, QC 69-73.
- MONGRAIN, A., FRALIC, G., GURNEY, C., SINGH, S., SHAND, D., VALLEE, M. 2004. "Model predictive control of newsprint brightening ". *Control Systems 2004 Conference, 14-18 juin 2004*. Québec, QC. 75-79.
- MUNROE, D.C., TEODORESCU, G. 1990. "Higher brightness mechanical pulps with sodium hydrosulfite/Successful mill operation". *1990 Tappi Pulping Conference*. 14-17 octobre 1990. Toronto, ON. 271-290.
- NARASIMHAN, S., JORDACHE, C. 2000. "Data Reconciliation & Gross Error Detection". *Introduction to Gross Error Detection*.. Houston : Gulf Publishing Company. 174-217.

- PAPTAC 1993. "Brightness of pulp, paper and paperboard". Standard E.1.
- PAPTAC 1993. "Forming handsheets for optical tests of pulp". Standard C.5.
- POIRIER, N.A., PIKULIK, I.I., LABADIE, M., PAGEAU, A. "The effect of pH on the optical properties of paper". *Journal of Pulp and Paper Science*. 22:11. J419-422.
- RAGNAR, M. 2004. "Evaluation of bleachability - A recommendation against the OXE concept". *Nordic Pulp and Paper Research Journal*. 19:3. 286-290.
- RAPSON, W.H., WAYMAN, M., ANDERSON, C.B. 1965. "Hydrosulfite and Peroxide Bleaching of Nine Pure Species Groundwoods". *Pulp and Paper Magazine of Canada*. 66:5. 255.
- SMEDBERG, G.E., STALTER, N.J. 1957. "How to Bleach Mechanical Pulp Made from Chips". *Paper Trade Journal*. 141:51. 20-25.
- SOPENLEHTO, T., MOILANEN, J. 1988. "Control of mechanical pulp bleaching based on in-line brightness and residual measurements ". *1988 Pulping Conference, Oct 30-Nov 2 1988*. New Orleans, LA, USA . 359-365.
- TAPPI 1998. "Analysis of sodium hydrosulfite". *Tappi Test Methods, 1998-1999 test methods*. T 4622 cm-84.
- TAPPI 1998. "Brightness of pulp, paper, and paperboard". *Tappi Test Methods, 1998-1999 test methods*. T 452 om-98.
- TAPPI 1998. "Forming handsheets for reflectance testing of pulp". *Tappi Test Methods, 1998-1999 test methods*. T 218 sp-97.
- XU, E.C., SABOURIN, M.J. 1998. "Brightness and Bleachability of

Thermomechanical Pulp". *Pulp and Paper Canada*. 99:3. 38-44.