

# Application industrielle d'un régulateur à modèle interne (RMI) du n<sup>ème</sup> ordre avec compensation de perturbations mesurables.

H. Coppier<sup>1</sup>, M. Chadli<sup>2</sup>, H. Jacquin<sup>3</sup>, P. Delesalle<sup>3</sup>

[coppier@esiee-amiens.fr](mailto:coppier@esiee-amiens.fr); [mohammed.chadli@u-picardie.fr](mailto:mohammed.chadli@u-picardie.fr)

[hubert.jacquin@be.thalesgroup.com](mailto:hubert.jacquin@be.thalesgroup.com); [patrice.delesalle@fr.schneider-electric.com](mailto:patrice.delesalle@fr.schneider-electric.com)

<sup>1</sup>ESIEE-Amiens, <sup>2</sup>UPJV-MIS (E.A. 4290)-Amiens, <sup>3</sup>Schneider Electric

**Résumé**— Dans cet article, nous présentons les algorithmes de régulation à modèle interne (IMC) pour un système du nième ordre avec compensation de perturbations mesurables. L'objectif est de proposer des solutions de contrôle adaptées à la régulation industrielle, implémentables sur des automates Schneider Electric et hautement performantes. Les développements ont été principalement motivés par une demande du groupe Alstom pour un surchauffeur à vapeur dans une centrale thermique mais ont vocation à être généraux pour une large gamme de boucles de régulation. Dans la première section, nous verrons le régulateur à modèle interne (RMI) pour procédés du nième ordre développé sous forme de fonction paramétrable dans Unity pro atelier logiciel de la famille des automates Schneider. La régulation à modèle interne est présentée avec son implémentation sur automate programmable, et des résultats comparés à ce qu'auraient donné d'autres algorithmes de contrôle comme la commande prédictive fonctionnelle. Dans la seconde section nous présentons une méthode de compensation de perturbations mesurables (feed-forward) prévue pour être associée aux régulateurs à modèle interne du nième ordre.

**Mots-clés**— Algorithme de contrôle avancé, régulation à modèle interne, commande prédictive, régulation multi-ordres, perturbations mesurables.

## I-INTRODUCTION

La plupart des régulateurs dans l'industrie sont des régulateurs PID (Proportionnel, Intégral, Dérivé). Dans certains cas, pour améliorer les performances en terme de temps de réponse, dépassement, robustesse, consommation d'énergie..., on utilise des régulations dites avancées. Nous pouvons citer entre autres la commande prédictive fonctionnelle (PFC), les correcteurs numériques polynomiaux (RST) ou encore les correcteurs à modèle interne (IMC) [1][5][6].

Le réglage de ces régulateurs est obtenu à partir d'une identification des paramètres du procédé et de la définition du comportement souhaité. Généralement, il est suffisant de modéliser le procédé par un premier ordre avec retard pur. Néanmoins, il existe des cas très particuliers de régulation industrielle où les procédés sont d'ordre élevé et nécessitent des régulateurs en rapport.

Schneider Electric, et en particulier son centre de compétences process Ile de France, a été sollicité par Alstom Power Service afin de proposer une solution de contrôle avancé pour la rénovation d'une centrale thermique en Algérie. Dans cet article, nous nous focaliserons sur

l'algorithme de régulation qui permettra de réguler la température de la vapeur à l'entrée des turbines. L'algorithme est développé avec Unity Pro pour les automates de la gamme Quantum et Premium et fera partie de la solution globale CPC de Schneider.

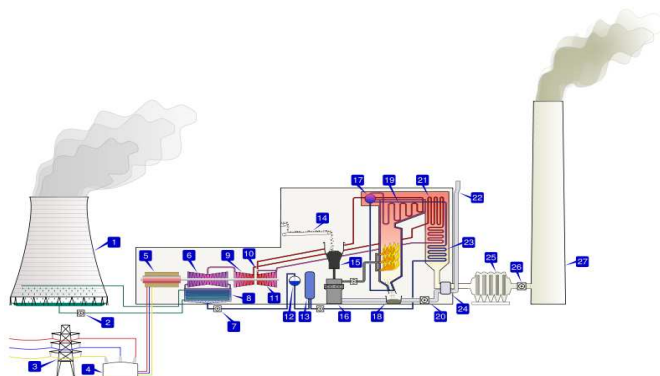


Diagramme d'une centrale à charbon "standard"

- |                                    |                                 |                                    |
|------------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|
| 1. Réfrigérant atmosphérique       | 10. Vanne de contrôle de vapeur | 19. Surchauffeur                   |
| 2. Pompe de circulation            | 11. Turbine vapeur à HP         | 20. ventilateur de soufflage       |
| 3. Ligne de transmission triphasée | 12. Dégazeur                    | 21. Resurchauffeur                 |
| 4. transformateur                  | 13. Réchauffeur d'eau           | 22. Aspiration d'air de combustion |
| 5. Alternateur                     | 14. Convoyeur à charbon         | 23. Économiseur                    |
| 6. Turbine vapeur BP               | 15. Silos à charbon             | 24. Réchauffeur d'air              |
| 7. Pompe à eau                     | 16. Broyeur charbon             | 25. Dépoussiéreur électrique       |
| 8. Condenseur                      | 17. Ballon chaudière            | 26. ventilateur de tirage          |
| 9. Turbine à vapeur                | 18. Cendrier                    | 27. Cheminée                       |

La régulation de la température de la vapeur à l'entrée de la turbine nécessite de modéliser le système par une équation d'état non linéaire du quatrième ordre [9], et qui ne peut être correctement réglé qu'avec une stratégie de commande avancée.

Schneider Electric possède deux bibliothèques de régulateurs avancés dit « à modèle » sur Unity Pro.

La première est une bibliothèque de commande prédictive fonctionnelle PCR utilisée avec satisfaction chez de

nombreux client. Cependant, elle ne dispose pas de régulateur du 4<sup>ème</sup> ordre. Il est, de plus, apparu dans la pratique qu'il est difficile de faire passer le savoir faire aux clients de manière satisfaisante.

La seconde est une bibliothèque de régulateurs à modèle interne IMC que nous avons décidé de moderniser afin de lui adjoindre un régulateur à modèle multi-ordre ( $n=1$  à 4) dont le modèle peut être modifié en temps réel. Cette stratégie permet de répondre spécifiquement au problème posé par Alstom, d'optimiser le temps de développement des futurs projets ainsi que d'élargir le panel d'offres Schneider Electric en développant cette bibliothèque de régulateurs à modèle interne.

Lors de la modernisation de la bibliothèque, nous avons décidé de développer en plus un module supplémentaire pour la compensation de perturbations mesurables (régulation de tendance). Ce qui permet de répondre à un ensemble plus vaste d'applications. L'objectif affiché était de disposer des mêmes fonctionnalités que celles de la bibliothèque de commande prédictive PCR tout en conservant la même simplicité de paramétrage.

Les résultats ont montré que l'ensemble des performances obtenues par la commande prédictive peuvent être atteintes par une stratégie de régulation à modèle interne du type de la bibliothèque IMC.

La régulation à modèle interne (IMC) telle que développée par Menahem chez Contrôle Bailey [8] et par Garcia et Morari [5] dans les années 80, est une stratégie de commande par retour d'état sur un modèle comportemental du procédé (observateurs). Cette stratégie permet de disposer d'un algorithme nécessitant peu de paramètres (modèle du procédé et gain du retour d'état) tout en étant optimisé et robuste.

## II. REGULATEUR A MODELE INTERNE DU N<sup>ème</sup> ORDRE

### A. Présentation générale du régulateur à modèle interne

Le régulateur à modèle interne possède deux atouts pour la régulation industrielle. D'une part, il est développé dans le domaine fréquentiel. Ce qui permet de manipuler des variables possédant un sens physique généralement bien compris des utilisateurs industriels. D'autre part, il est moins complexe à régler que la commande polynomiale RST ou la commande prédictive fonctionnelle. En effet, l'utilisateur final n'a pas à se soucier de la période d'échantillonnage, d'un horizon de prédiction ou encore d'une équation Diophantine. L'utilisateur final ne doit définir que le modèle du procédé et la fonction de transfert désirée en boucle fermée. En réalité, il suffira dans l'application industrielle de fixer la rapidité souhaitée en boucle fermée. Ce qui fait du régulateur à modèle interne IMC un régulateur très efficace pour le contrôle de procédés industriels. Ci-après le régulateur à modèle interne par Menahem M. [8] :

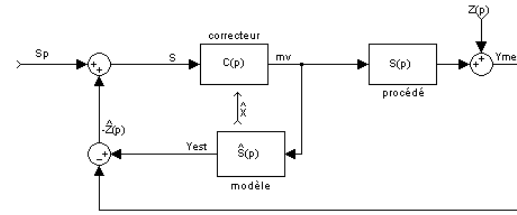


Fig. 1. Structure générale du régulateur

Le premier rôle du modèle est de reconstituer les perturbations à l'entrée du régulateur. Pour cela, on approxime que toutes les perturbations peuvent être ramenées à une perturbation équivalente agissant directement sur la mesure. On peut donc estimer les perturbations par l'écart entre la sortie du modèle et la mesure. La consigne virtuelle du procédé  $S$  est la consigne  $S_p$  à laquelle on retranche la perturbation équivalente  $Z(p)$ .

Le second rôle du modèle est de calculer la loi de commande en fonction du vecteur d'état du modèle par la méthode de placement de pôles. Si le modèle est parfait,  $C(p)$  est donc équivalent un correcteur en chaîne ouverte, ce qui a pour avantage d'assurer la stabilité du procédé régulé.

Dans le choix du correcteur, il faut tenir compte des termes non compensables (tel que le retard pur). On pose donc

$$S(p) = S_0 S_1(p) \cdot S_2(p) \quad (1)$$

On regroupe tous les termes non compensables dans  $S_2(p)$ , les termes compensables dans  $S_1(p)$  et le gain statique  $S_0$ .

On déterminera donc le correcteur  $C(p)$  en fonction de  $S_1(p)$  et d'une dynamique choisie qui respecte la physique du procédé.  $C(p)$  sera donc de la forme  $C(p) = \frac{S'(p)}{S_1(p)}$  avec

$S'(p)$  la fonction de transfert désirée en boucle fermée.

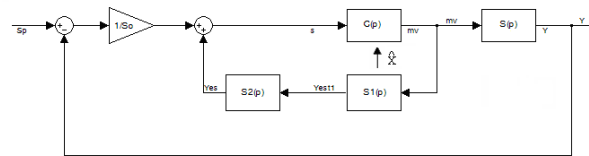


Fig. 2. Structure générale du régulateur avec les fonctions compensables et non compensables

Le gain unitaire est assuré en divisant l'écart mesure-consigne par le gain statique  $S_0$ . Cela permet d'annuler l'erreur statique.

Le placement des pôles s'effectue par un retour d'état sur la partie compensable du modèle.

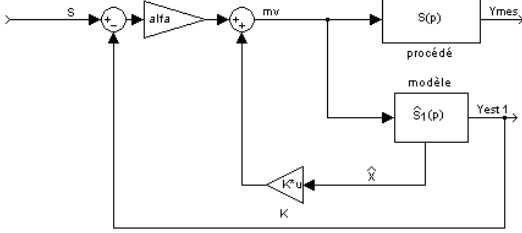


Fig. 3. Structure du correcteur

Le choix des paramètres  $\alpha$  et  $K$  du correcteur est obtenu par identification avec le comportement choisi en boucle fermée.

### B. Amélioration des performances du régulateur

#### 1. Filtrage de la mesure sans déphasage additionnel

Dans certains cas, en raison de perturbations particulières, il est nécessaire de filtrer la mesure. Dans une régulation PID classique, on place un filtre sur la mesure ce qui introduit un déphasage supplémentaire au niveau de la fonction de transfert du procédé vu par le correcteur.

De part sa structure, le régulateur IMC permet de placer un filtre  $H(p)$  dit de robustesse après la comparaison modèle/procédé, ce qui n'introduit pas de déphasage du modèle par rapport au procédé.

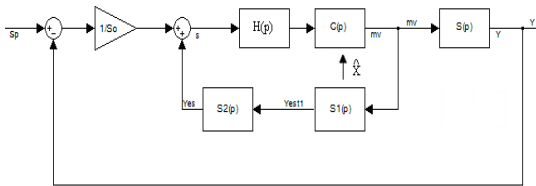


Fig. 4. Structure générale du régulateur IMC avec filtre de robustesse

#### 2. Synchronisation de la mesure et du modèle

Si la mesure et la sortie du modèle ne sont pas échantillonnées à la même fréquence (par exemple dans le cas où la prise de mesure est lente) on peut synchroniser la sortie du modèle avec la mesure de manière à travailler en chaîne ouverte entre les échantillons et recentrer le système lorsque la mesure est valide (les perturbations sont reconstituées à chaque échantillonnage). En pratique on place des échantillonneurs bloqueurs de même fréquence sur la mesure et sur la sortie du modèle.

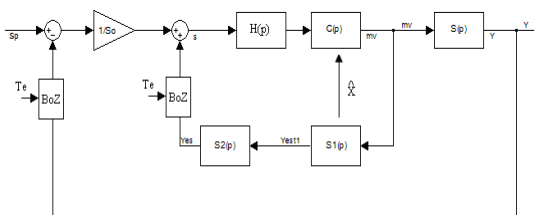


Fig. 5. Structure générale du régulateur IMC avec synchronisation de la mesure et du modèle

### 3. Prise en compte des contraintes externes

Il arrive fréquemment que la commande souhaitée par le régulateur ne soit pas la commande réellement transmise au procédé. A titre d'exemple on pourra citer la limitation de la commande dans une plage acceptable pour l'actionneur (valeurs minimales et maximales, vitesse de variation maximale), dans le cas d'une boucle de régulation en cascade ou de la reprise en mode manuel de l'actionneur.

Pour permettre au régulateur de prendre en compte cette différence il faut piloter le modèle par la commande réellement transmise au procédé.

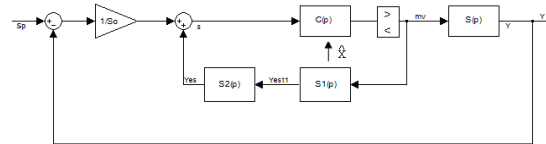


Fig. 6. Structure générale du régulateur IMC avec prise en compte des contraintes externes

### C. Application au cas industriel

#### 1. Choix d'un modèle typique

On constate ici que ce type de régulation peut convenir à tout système commandable et observable. Cependant, l'objectif, dans notre cas, est de construire un régulateur pour un utilisateur industriel. Ce qui nous impose de définir une forme typique du modèle.

En pratique, les procédés industriels sont modélisés par une fonction de transfert, ce qui assure la commandabilité et l'observabilité du système. De plus Schneider Electric dispose d'un identifieur performant OptiReg© [10] qui identifie les procédés sous forme d'un produit de fonctions de transfert du 1<sup>er</sup> ordre dans le domaine de Laplace. Soit  $S(p)$  la fonction de transfert identifiée.

$$S(p) = \frac{S_0}{\prod_{i=1}^n (\theta_i p + 1)} e^{-\tau p} \quad (2)$$

avec  $S_0$  : Gain statique  
 $\theta_i$  : Constante de temps de rang  $i$   
 $\tau$  : Retard pur.

Nous avons donc choisi comme paramètres pour le régulateur un modèle de la forme :

$$S(p) = \frac{S_0}{(\theta_1 p + 1)(\theta_2 p + 1)(\theta_3 p + 1)(\theta_4 p + 1)} e^{-\tau p} \quad (3)$$

Avec la possibilité pour l'utilisateur de configurer des paramètres à zéro.

#### 2. Choix de la fonction de transfert en boucle fermée

Après l'élaboration de plusieurs solutions possibles, nous avons fait le choix suivant : le régulateur devrait permettre

d'obtenir une fonction de transfert pour laquelle toutes les constantes de temps sont divisées par un facteur commun. Cette solution présente l'avantage de disposer d'un paramètre de réglage unique et simple d'utilisation. De plus, d'un point de vue programmation les calculs sont facilités. On aura donc  $S'(p)$  la fonction de transfert en boucle fermée de la forme :

$$S'(p) = \frac{1}{\left(\frac{\theta_1}{n}p + 1\right)\left(\frac{\theta_2}{n}p + 1\right)\left(\frac{\theta_3}{n}p + 1\right)\left(\frac{\theta_4}{n}p + 1\right)} e^{-\tau p} \quad (4)$$

Avec 'n' le facteur d'accélération du système, on aura le système en boucle fermée qui sera 'n' fois plus rapide que le procédé en boucle ouverte.

### 3. Implémentation dans l'automate

Le schéma composé de quatre intégrateurs permet de représenter facilement le régulateur d'ordre 1 à 4.

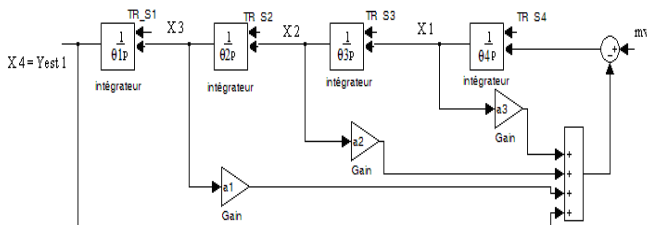


Fig. 7. Structure du régulateur

La fonction intégrale possède un bit de tracking ce qui permet de court-circuiter un intégrateur si le modèle est d'ordre inférieur à 4. Elle tient compte de la période d'exécution du bloc de manière transparente. Les paramètres sont directement obtenus à partir des paramètres du modèle et peuvent être recalculés à chaque exécution de l'algorithme si le modèle est non linéaire.

La partie non compensable se résume, dans notre cas, au retard pur. Comme la majorité des procédés industriels ont des retards purs variables, nous avons prévu de pouvoir le modifier en temps réel.

La fonction contient un buffer FIFO d'une taille arbitraire de 200 réels. La période d'échantillonnage du retard ( $T_e$ ) est fixée par le retard maximum que présente le procédé.

$T_e = \frac{Delai\_max}{200}$ . Le buffer contient les 200 dernières

valeurs du signal représentant un intervalle de temps égal au retard maximum. Pour toutes valeurs du retard pur plus petites que le retard maximum l'algorithme sélectionne la sortie correspondante.

### III. RESULTATS OBTENUS

L'exemple suivant a été programmé sur automate Schneider Premium sous forme de bloc fonctionnel DFB nommé *IMCM4\_V1* et ensuite testé :

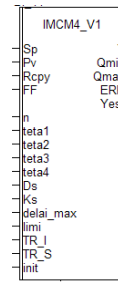
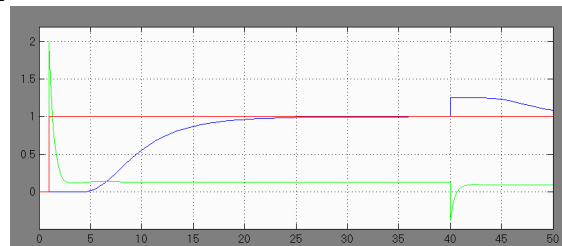


Fig. 8. Bloc fonctionnel IMCM4\_V1

On peut y voir tous les paramètres nécessaires comme le modèle du procédé ainsi que le paramètre n qui spécifie la fonction de transfert en boucle fermée du 4<sup>ème</sup> ordre.

$$S(p) = \frac{8}{(8p + 1)(1p + 1)(2p + 1)(2p + 1)} e^{-3p} \quad (5)$$

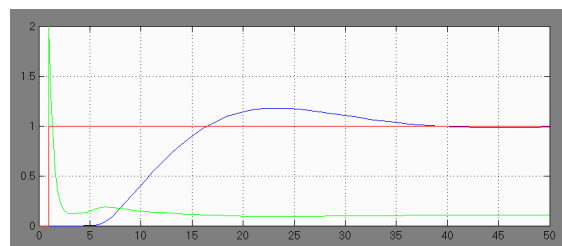
$n = 2$



Vert : loi de commande ; rouge : consigne ; bleu : mesure du procédé.

Fig. 9. Réponse à un échelon de consigne et à un échelon de perturbation de 25%

On remarque que le système en boucle fermée est bien deux fois plus rapide, que le gain statique est unitaire et que la perturbation est bien amortie.



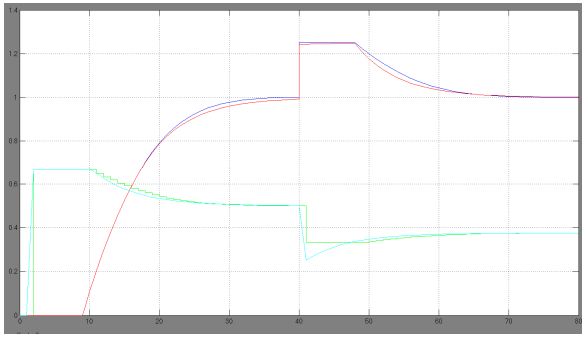
Vert : loi de commande ; rouge : consigne ; bleu : mesure du procédé.

Fig. 10. Réponse à un échelon de consigne et à un échelon de perturbation de 25% avec variation des paramètres du modèle de 20%

On remarque que malgré des erreurs importantes de modélisation l'algorithme converge quand même. L'algorithme est donc relativement robuste.

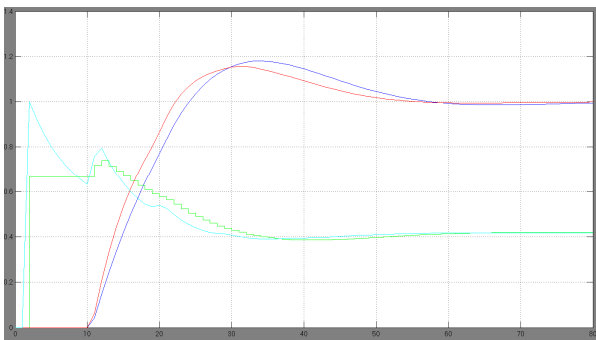
#### Comparaison avec un algorithme prédictif

Les deux régulateurs ont été paramétrés de manière à obtenir la même constante de temps en boucle fermée.



Vert : loi de commande prédictive ; bleu: mesure avec un algorithme prédictif; Turquoise : loi de commande avec un IMC ; rouge : mesure du procédé avec un IMC.

Fig.11. Réponse à un échelon de consigne unitaire et à un échelon de perturbation de 25% (saturation de la commande à 65%)



Vert : loi de commande du prédictif ; bleu: mesure avec un algorithme prédictif; Turquoise : loi de commande avec un IMC ; rouge : mesure du procédé avec un IMC.

Fig.12. Réponse à un échelon de consigne et à un échelon de perturbation de 25% avec variation des paramètres du modèle de 20%.

#### IV. COMPENSATION DE PERTURBATIONS MESURABLES

##### A. Résolution du problème posé

Il arrive fréquemment que l'on puisse mesurer des grandeurs physiques qui auront une influence sur la grandeur réglée. La fonction suivante a été développée spécifiquement pour être associée à l'IMC du nième ordre afin d'anticiper l'effet de perturbations mesurables et de minimiser leurs effets sur la mesure.

Dans le projet Schneider/Alstom que nous étudions, la température de la vapeur mesurée à la sortie du surchauffeur est, bien sûr, fonction du débit d'eau de surchauffe injectée puisque c'est la grandeur sur laquelle on agit, mais aussi du débit et de la température de la vapeur à l'entrée du circuit. On peut donc souhaiter diminuer l'influence de ces perturbations sur la mesure de sortie en élaborant une action correctrice anticipatrice.

Le correcteur à modèle interne reconstitue l'effet de l'ensemble des perturbations. Pour répondre spécifiquement à une perturbation mesurée dont on a identifié l'influence sur procédé, il faut retrancher son action de la perturbation totale reconstituée, et la remplacer par une action anticipatrice élaborée à partir de la mesure de la perturbation.

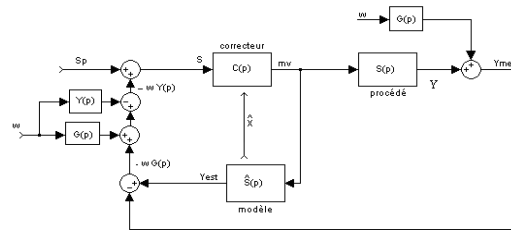


Fig.13. régulateur à modèle interne avec correcteur à action anticipatrice

Pour annuler l'effet de la perturbation 'w' sur la mesure la fonction de transfert de l'action correctrice s'écrit :

$$Y(p) = \frac{G(p)}{S'(p)}$$

Si le procédé peut être modélisé par un nième ordre on peut raisonnablement penser que dans un contexte industriel l'effet d'une perturbation sera généralement assimilé à un ordre plus petit étant donné les difficultés d'identification. Or pour que la fonction de transfert \$Y(p)\$ soit réalisable il faut que l'ordre de la perturbation soit inférieur ou égal à celle du procédé. Nous avons donc décidé de ramener les fonctions de transfert à un premier ordre avec retard pur équivalent.

Nous avons utilisé l'approximation suivante aux basses fréquences :

$$S(p) = \frac{e^{-\tau p}}{\prod_{i=1}^n (\theta_i p + 1)} \approx \frac{e^{-\tau' p}}{\theta' p + 1} \quad (6)$$

$$\text{avec } \theta' = \sqrt{\sum_{i=1}^n \theta_i^2} \quad \text{constante de temps équivalente}$$

$$\text{et } \tau' = \tau - \theta' + \sum_{i=1}^n \theta_i \quad \text{retard pur équivalent.}$$

##### B. Implémentation et résultats

Le correcteur à action anticipatrice a été implémenté sous forme d'un bloc fonction DFB *IMCFFM4\_V1* sous Unity. Elle nécessite trois paramètres : la mesure de la perturbation, le modèle du procédé en boucle fermée et le modèle de l'influence de la perturbation. Elle peut être associée à un régulateur IMC d'ordre 4 au moyen d'une seule variable comme le montre la figure suivante :

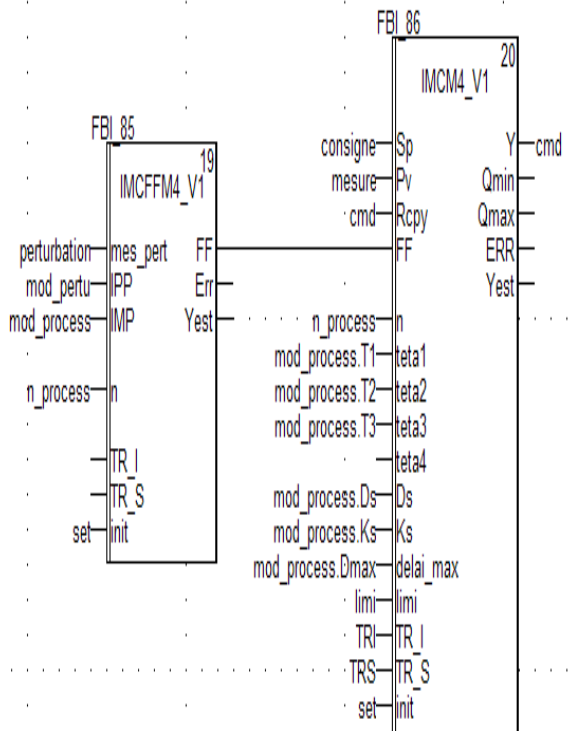


Fig.14. Blocs fonctionnels DFB IMCFFM4\_V1 et IMCM4\_V1

Le premier bloc calcule le correcteur anticipateur avec le modèle de la perturbation.

Les résultats sont les suivants :

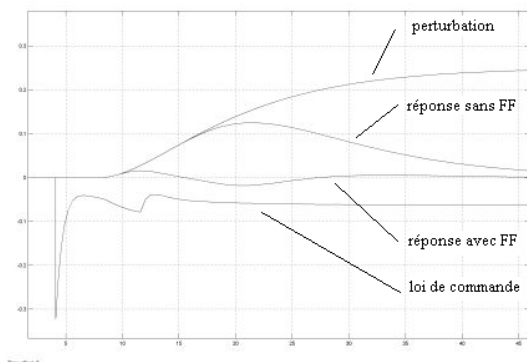


Fig.15. Réponses à une perturbation sans/avec correction

## V. CONCLUSION

Si les performances des deux régulateurs prédictifs et à modèle interne sont très similaires tant au point de vue de la robustesse que de la réponse à une perturbation, on peut trouver des différences dans la « philosophie » de la régulation.

Pour commencer, la commande prédictive fonctionne en temps échantillonné alors que l'IMC fonctionne en temps pseudo continu (fréquence de calcul du processeur). Ensuite, d'un point de vue des réglages la régulation à modèle est plus simple d'utilisation puisque tous les paramètres ont un sens physique et leur nombre est limité. Enfin, le correcteur à modèle impose une trajectoire physiquement compatible avec le procédé quelque soit l'ordre du procédé et la forme de sa consigne, alors que le prédictif fixe une trajectoire

choisie généralement du 1<sup>er</sup> ordre, incompatible avec des procédés d'ordre plus élevé. Seul le fait de ne fixer qu'un point de coïncidence lointain et de s'exprimer en temps de réponse en boucle fermée permet d'obtenir une réponse admissible, mais qui n'est qu'une approximation. Pour conclure, alors que l'IMC ne nécessite que deux réglages simples d'utilisation (le modèle du procédé et un gain de vitesse). La commande prédictive prend en compte toujours plus de paramètres (modèle du procédé, horizon de prédiction, période d'échantillonnage, nombres de points de coïncidence,...) qui influencent tous la réponse du procédé en boucle fermée. Ensuite, elle est aisément programmable sur des automates et couvre un large panel de problèmes de régulation (régulation multi-Ordre, compensation de perturbations mesurables). D'autre part il serait intéressant de poursuivre l'étude quand au suivi de trajectoire en rampe. Enfin, elle présente de très bonnes performances en termes de robustesse et de convergence.

Nous pouvons donc proposer à Alstom un régulateur performant pour son surchauffeur à vapeur et disposer de fonctions de régulation performantes sur d'autres projets comme la régulation en position des ascenseurs de la tour Eiffel.

## REFERENCES

- [1] Cabaret S. Algorithmes de contrôles avancés pour les installations à gaz du LHC du CERN suivant le framework et l'approche dirigée par les modèles du projet CGS. Thèse de doctorat de l'Université de Picardie Jules Verne, Mars 2008.
- [2] Coppier H., Cabaret S. et Pezzetti M. De l'identification du modèle au contrôle : le multicontrôleur, stratégie pour la régulation avancée dans les systèmes complexes des expériences du CERN. 5ème Conférence Internationale Francophone d'Automatique, CIFA'2008, Bucarest, Roumanie, 3-5 septembre 2008.
- [3] Borne P., Ben Abdennour R., Ksouri M., M'sahli M., *Identification et commande numérique des procédés industriels*, Technip, Paris, 2001.
- [4] Richalet J., Dreyfus G., Lavielle G., Mallet J., *La commande prédictive, Mise en œuvre et applications industrielles*, Eyrolles, 2004.
- [5] Garcia C.E., Morari M., "Internal Model Control: 1. A Unifying Review and Some New Results," Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev. 21 pp. 308-323, 1982.
- [6] Morari M., Model Predictive Control: Past, Present and Future, PSE'97/ESCAPE-7, Trondheim, Norway, 1997.
- [7] Landau I.D., *Commande des systèmes – conception, identification et mise en œuvre*, Hermès Science Publication, Paris, 2002
- [8] Menahem M., *Le correcteur à simulation – Description et utilisation du modèle CZ*, Contrôle Bailey, 1981
- [9] Etude Schneider des surchauffeurs
- [10] OptiReg© est une marque déposée de Schneider Electric du logiciel d'identification de procédés
- [11] Coppier H., Chadli M., Bruey S., Guthmann O., Delesalle P., Implementation of a fuzzy logic control for a silo's level regulation in stone quarries. ANFC07, Valenciennes, Novembre 2007.