

**This document must be cited according to its final version
which is the Master of Science thesis:**

Kamel Abid¹,

**« Commande prédictive sur un procédé de cuisson
de peinture en poudre avec de l'infrarouge »,
rapport de stage de fin d'études de**

**Master STS mention Génie Electrique Génie des Procédés,
parcours Génie des Procédés,
UCBL1, 2005-2006**

Advisors : Pascal Dufour¹ et Pierre Laurent¹

**All open archive documents of Pascal Dufour are available at:
<http://hal.archives-ouvertes.fr/DUFOUR-PASCAL-C-3926-2008>**

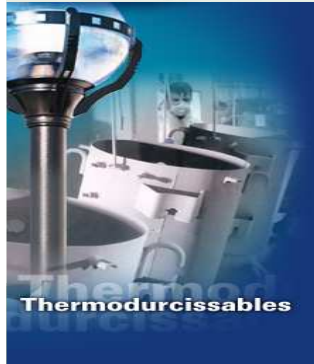
**The professional web page (Fr/En) of Pascal Dufour is:
<http://www.lagep.univ-lyon1.fr/signatures/dufour.pascal>**

1

Université de Lyon, Lyon, F-69003, France; Université Lyon 1;
CNRS UMR 5007 LAGEP (Laboratoire d'Automatique et de Génie des Procédés),
43 bd du 11 novembre, 69100 Villeurbanne, France
Tel +33 (0) 4 72 43 18 45 - Fax +33 (0) 4 72 43 16 99
<http://www.lagep.univ-lyon1.fr/> <http://www.univ-lyon1.fr> <http://www.cnrs.fr>



UNIVERSITE CLAUDE BERNARD LYON 1
43, bd du 11 Novembre 1918
69622 VILLEURBANNE



Master 2 : Génie des Procédés

Thème

**COMMANDE PRÉDICTIVE D'UN MODELE DE CUISSON DE
LA PEINTURE EN POUDRE AVEC
DE L'INFRAROUGE**

Présenté par : KAMEL ABID

Encadré par : Pascal Dufour
Laurent Pierre

18/09/2006

plan

- I Introduction
- II Présentation du procédé de cuisson de la peinture
- III Modélisation dynamique du procédé
- IV Discrétisation et Simulation du modèle
- V commande prédictive
- VI Approche prédictive en simulation
- VII Conclusion & Perspectives

I introduction

- Les commandes prédictives sont considérées comme des approches alternatives attractives.
- le problème principal de ces commandes est plus précisément la poursuite de trajectoire et de formulé en un problème d'optimisation.
- cette approche est actuellement possible grâce à la puissance des calculateurs

II *Présentation du procédé de cuisson de la peinture*

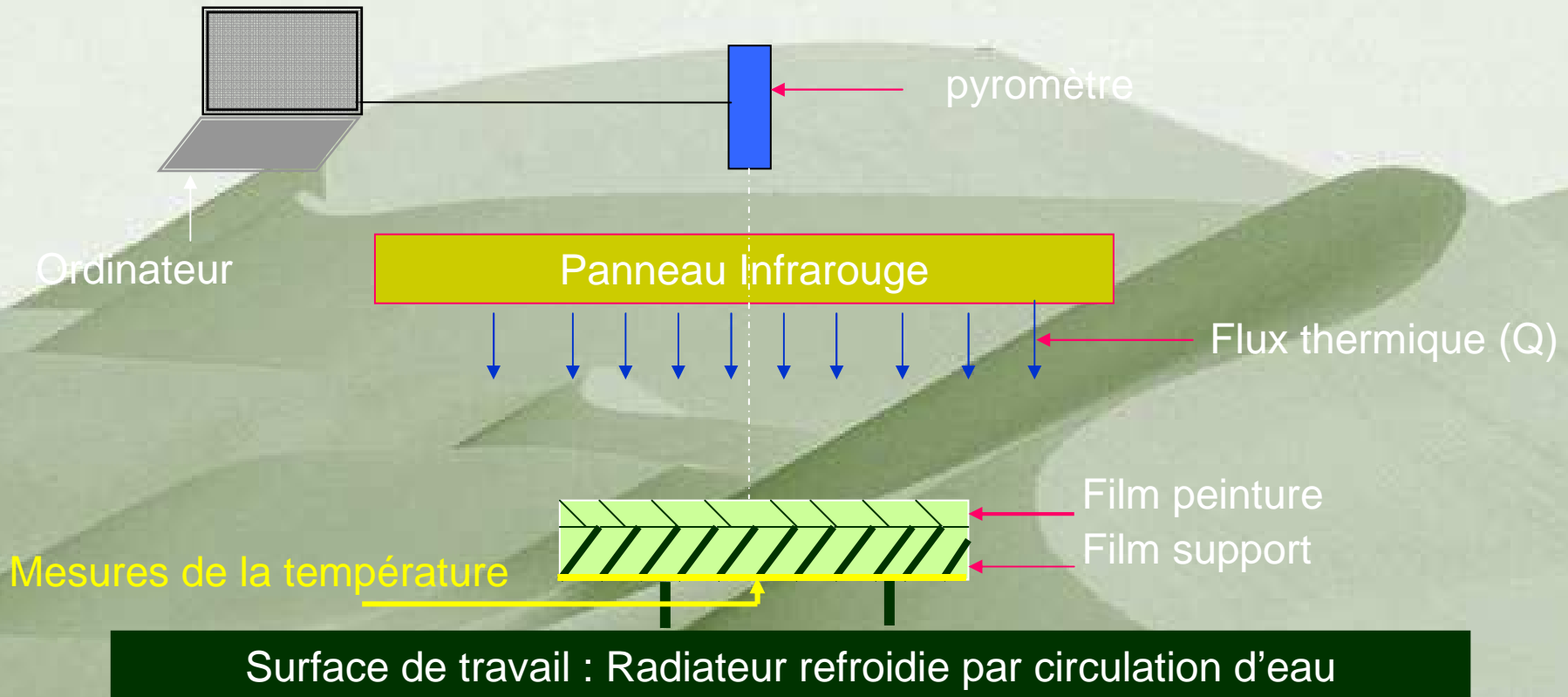


Fig.1 – schéma simplifiée du procédé

La variable de commande : le Flux de chaleur (Q)

Les variables à contrôler : Température

Taux de conversion

III Modélisation dynamique du procédé de la cuisson

Bilan énergétique et Matière

➤ FILM PEINTURE

- Bilan Thermique

$$\nabla(\lambda_p \nabla T_p) = \rho_p \cdot C_{p_p} \cdot \frac{\partial T_p}{\partial t} - \rho_p e_p \Delta H_0 A e^{\left(\frac{E_a}{RT_p}\right)} X^m (1-X)^n \quad \text{Avec } x \in]0 \quad x_M[\quad \text{et } t > 0$$

- Bilan Matière

$$\frac{\partial X}{\partial t} = A e^{\left(\frac{E_a}{RT_p}\right)} X^m (1-X)^n \quad \text{Avec } t > 0 \quad \text{Avec } x \in [0 \quad x_M]$$

➤ FILM SUPPORT

- Bilan Thermique

$$\nabla(\lambda_s \nabla T_s) = \rho_s \cdot C_{p_s} \cdot \frac{\partial T_s}{\partial t} \quad \text{Avec } x \in]x_M \quad x_N[\quad \text{et } t > 0$$

III Modélisation dynamique du procédé de la cuisson

Conditions aux limites et initiales

Extrémité supérieure de la peinture

$$X = 0 \quad \longrightarrow \quad -\lambda_p \frac{\partial T_{p1}}{\partial x} = \alpha Q - \sigma \varepsilon_p (T_{p1}^4 - T_1^4) - h_{a_p} (T_{p1} - T_1)$$

Les points commun entre peinture et support (continuités des flux)

$$X = M \quad \longrightarrow \quad -\lambda_p \frac{\partial T_{pM}}{\partial x} = -\lambda_s \frac{\partial T_{sM}}{\partial x}$$

Extrémité inférieure du support

$$X = N \quad \longrightarrow \quad -\lambda_s \frac{\partial T_{sN}}{\partial x} = \sigma \varepsilon_s (T_{sN}^4 - T_N^4) + h_{a_s} (T_{sN} - T_2)$$

IV

Discretisation et simulation

Discretisation

Méthode utilisée : différences finies

- Approximation du gradient

$$\frac{\partial T_i}{\partial x} \cong \frac{T_{i+1} - T_i}{2 \Delta x}$$

- Approximation du Hessien

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{T_{i-1} - 2T_i + T_{i+1}}{\Delta x^2}$$

Le système EDP's devient :

$$\dot{Etat} = A \times Etat + B(T) + C(\alpha Q) + G(T, X)$$

$$Etat = [T \ X]^T$$

La simulation à montrée que : $C(\alpha Q) \gg G(T, X)$

$$Etat = A \times Etat + B(T) + C(Q)$$

IV

Discretisation et simulation

Simulation Température

- Température au dessous du support représente la sortie.
- La commande est maximale
 $Q = 23,5 \text{ KW/m}^2$
- Variable d'état Température est observable

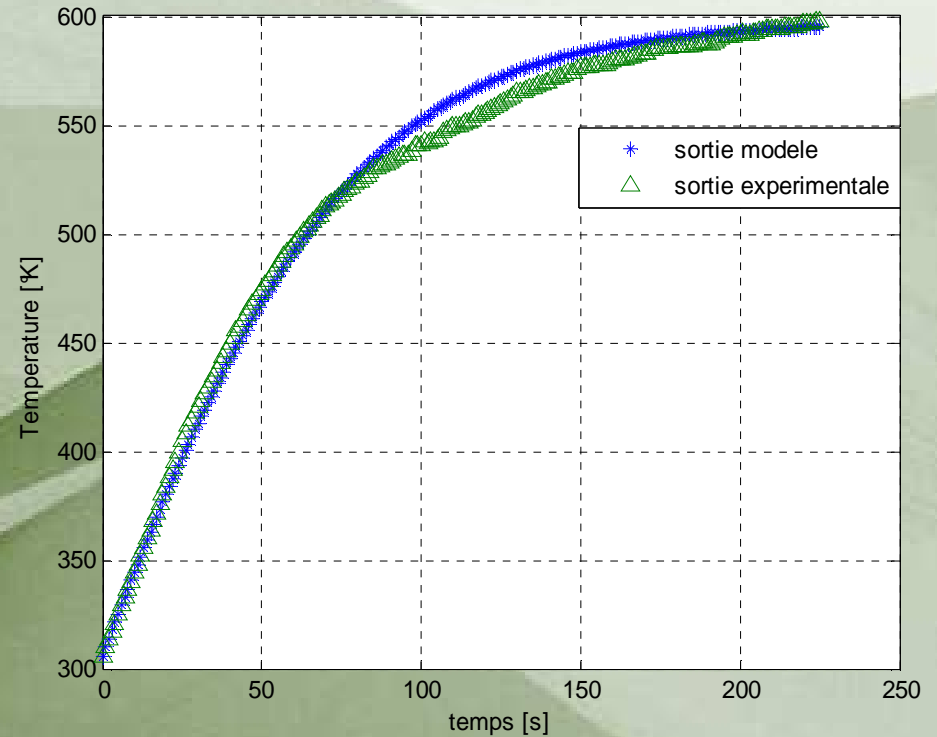


Fig.2 - Comparaison Température simulée et expérimentale

*Le système obtenu est parabolique
Erreur Maximale < 12 °*

IV

Discretisation et simulation

Simulation Taux de conversion

- La commande est maximale
- $Q = 23,5 \text{ KW/m}^2$
- Variable d'état Taux de conversion
Non observable

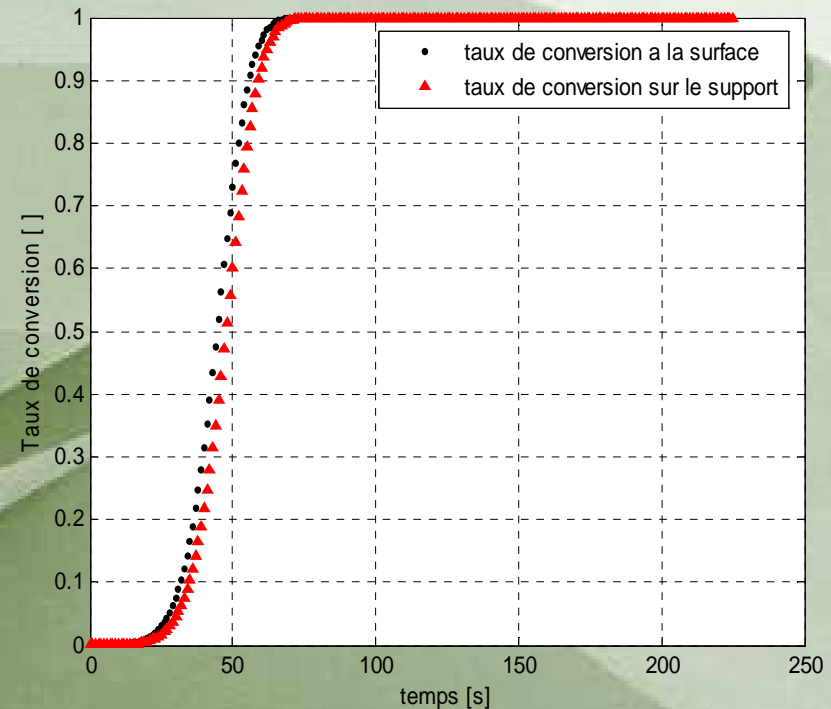


Fig.3 – Taux de conversion simulé entre les deux extrémités de la peinture

*Différence de 10 % entre les deux extrémités du film peinture
Pour une commande maximale*

V Commande prédictive

Principe de la commande prédictive : « horizon glissant »

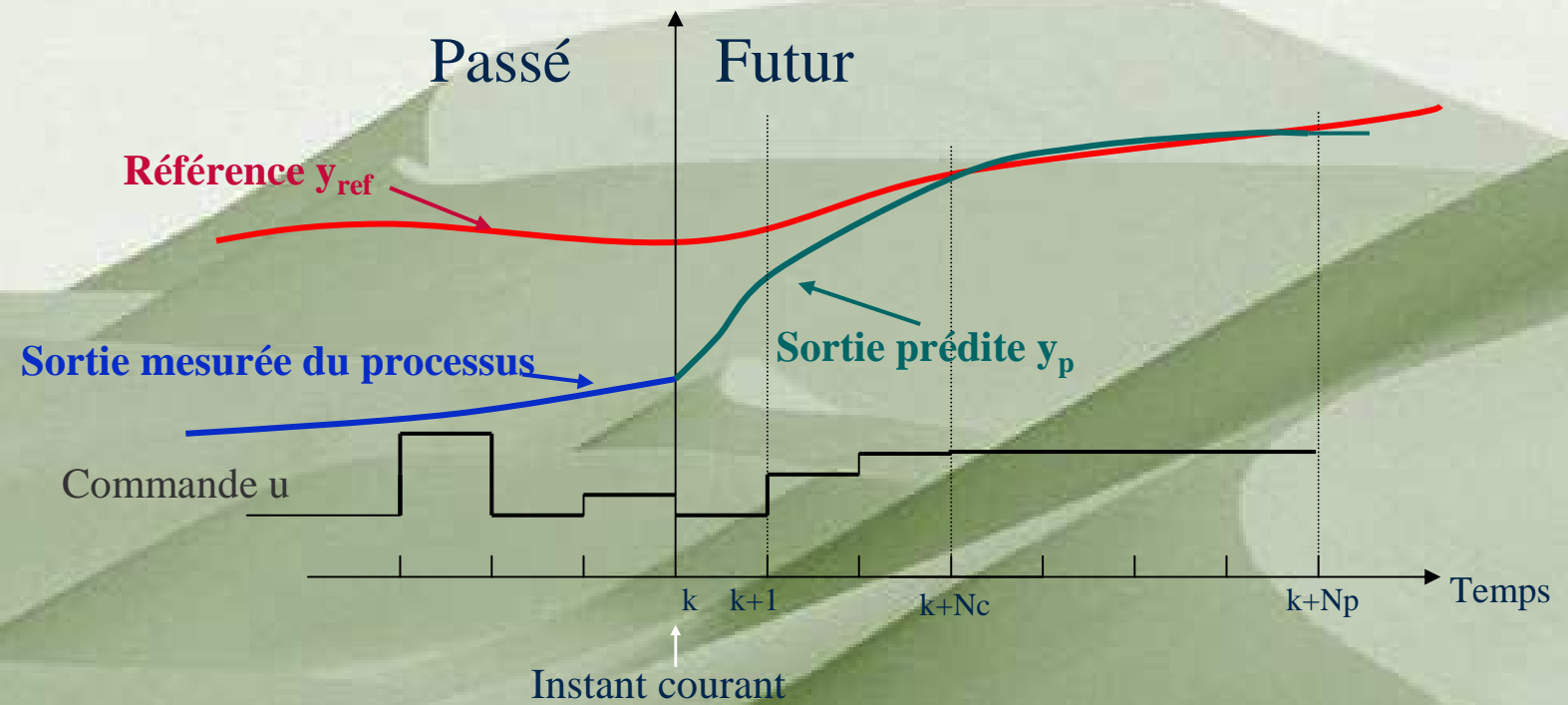


Fig.4 – Stratégie de MPC

N_c : horizon de commande
 N_p : horizon de prédiction

- $k = 0, 1, \dots, \text{temps final} + N_p$
- Dans le futur sur $[k+1 \quad k+N_p]$

Critère d'optimisation :

$$\min_{U_{k+1}, \dots, U_{k+N_c-1}} J = \sum_{j=k+1}^{j=k+N_p} (y_{ref}(j) - y_p(j))^2$$

La commande prédictive : Structure de commande

structure de commande par modèle interne

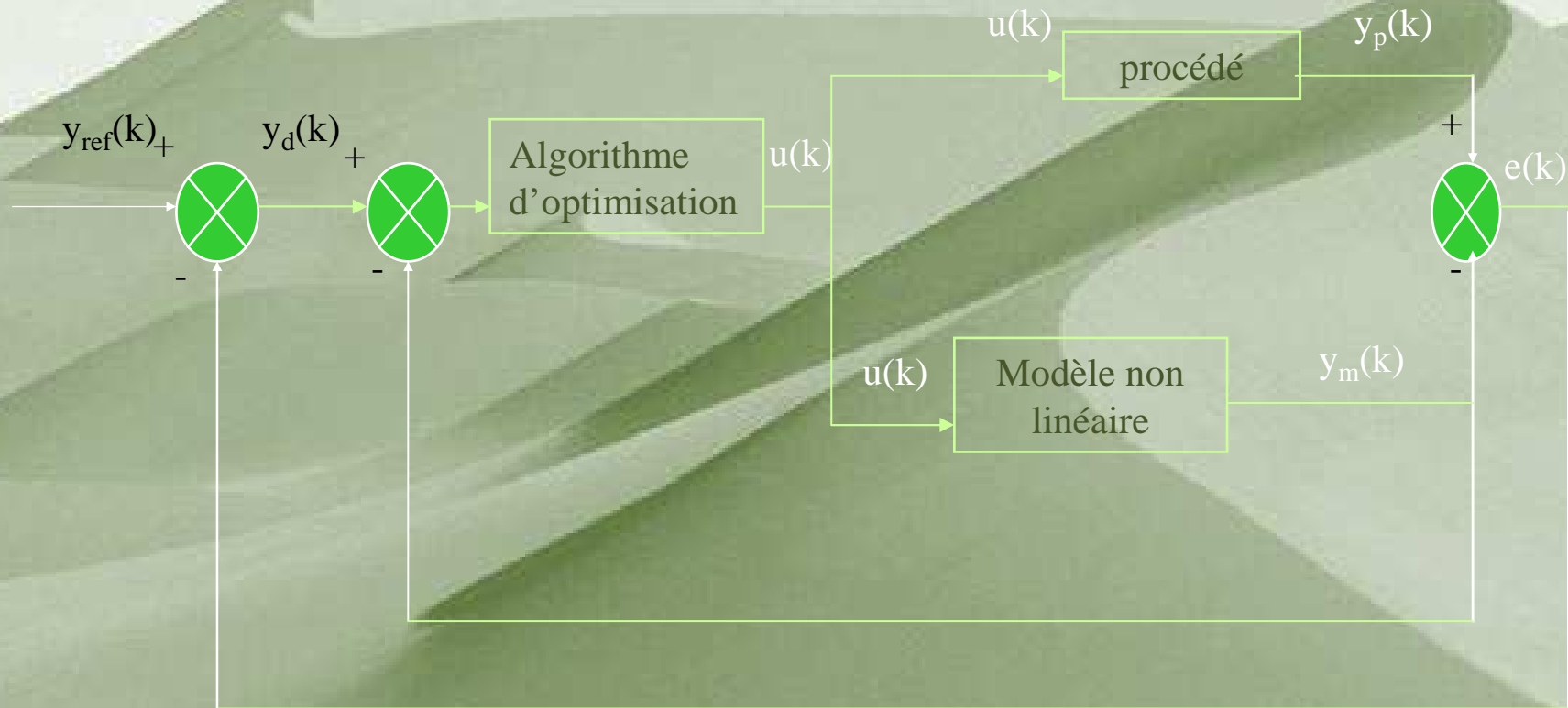


Fig.5 – Modèle interne

Inconvénient : Modèle non linéaire nécessite un temps de calcul très grand

Remède : remplacer le système non linéaire par le linéaire à temps variant

La commande prédictive : Structure de commande

Systeme linéaire à temps variant

SNL

Développement
Taylor ordre 1

$$\dot{\Delta X} = A_{LTV} \Delta X + B_{LTV} \Delta U$$

A_{LTV} : Matrice cubique

B_{LTV} : Matrice cubique

ΔX : Variable d'écart d'état

Une Matrice A et une Matrice
B chaque instant t

Avantage SLTV : Résolution rapide (Très bon temps de calcul)

Inconvénient SLTV : Erreur de linéarisation, elle est d'autant vraie que ΔU est petit

La commande prédictive : Structure de commande

Modèle interne linéarisé à temps variant

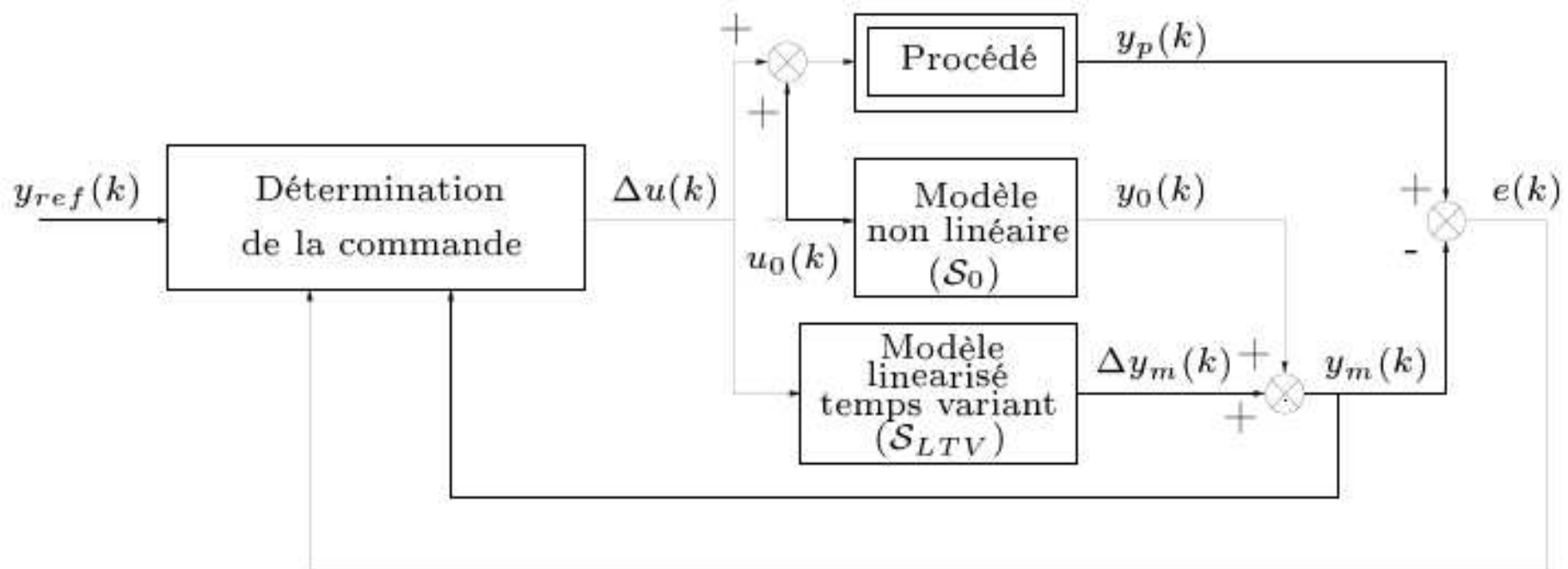


Fig.6 – Modèle interne basé sur SLTV

Problème d'optimisation sans contraintes

$$J = \min_{\Delta U} \left\{ J(\Delta U) = \sum_{j=k+1}^{j=k+Np} (y_{ref}(j) - e(k) - (y_0(j) + \Delta y_m(\Delta U(j))))^2 \right\}$$

La commande prédictive : les contraintes

contraintes sur la commande

transformation de variables

Système contraint

$$\begin{cases} U_{\min} \leq U(k) \leq U_{\max} \\ v_{\min} \Delta t \leq U(k) - U(k-1) \leq v_{\max} \Delta t \end{cases}$$



Transformation de variable (fonction hyperbolique)

$$U = f_{\text{moy}} + f_{\text{amp}} \tanh \left(\frac{p - f_{\text{moy}}}{f_{\text{amp}}} \right)$$



Système non contraint

Avantage : très efficace

Inconvénient : Peu sensible dans les limites

La commande prédictive : les contraintes

contraintes sur la sortie

Méthode de pénalité externe

À partir des $n_{co,ext}$ contraintes considérés

$$C_i(j) \leq 0$$

Le Fonction cout est pénalisé si les contraintes sont positives par :

$$J_{ext}(p) = \omega_i \sum_{j=k+1}^{j=k+N_p} \sum_{i=1}^{i=N_{cont}} \max^2(0, C_i(j))$$

Problème d'optimisation Final

$$J_{tot}(p) = J(p) + J_{ext}(p)$$

La commande prédictive

Résolution du problème pénalisé

Avec l'algorithme de Levenberg-Marquardt

$$\begin{cases} p^{i+1} = p^i + \Delta p^i \\ (\nabla^2 J_{tot} + \lambda I) \Delta p^i = -\nabla J_{tot}^i \end{cases}$$

p : paramètre à identifier

∇^2 : Le Hessien

∇ : Le gradient

Méthode Lavenberg-Marquardt : Converge très vite

Approche prédictive en simulation

Poursuite de trajectoire

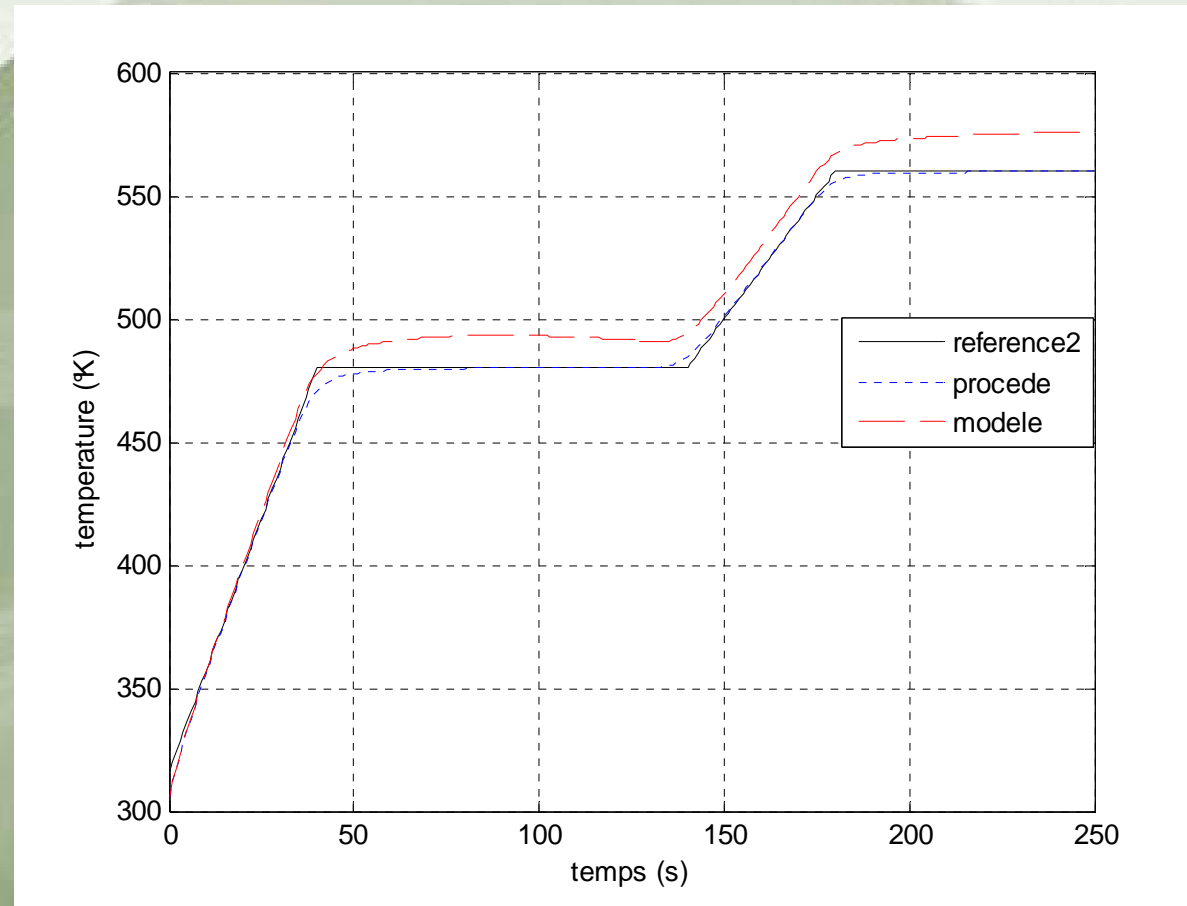


Fig.7 – poursuite de trajectoire de température

la poursuite de la référence est quasi-exacte

Réalisation de MPC en simulation

Contraintes sur la commande

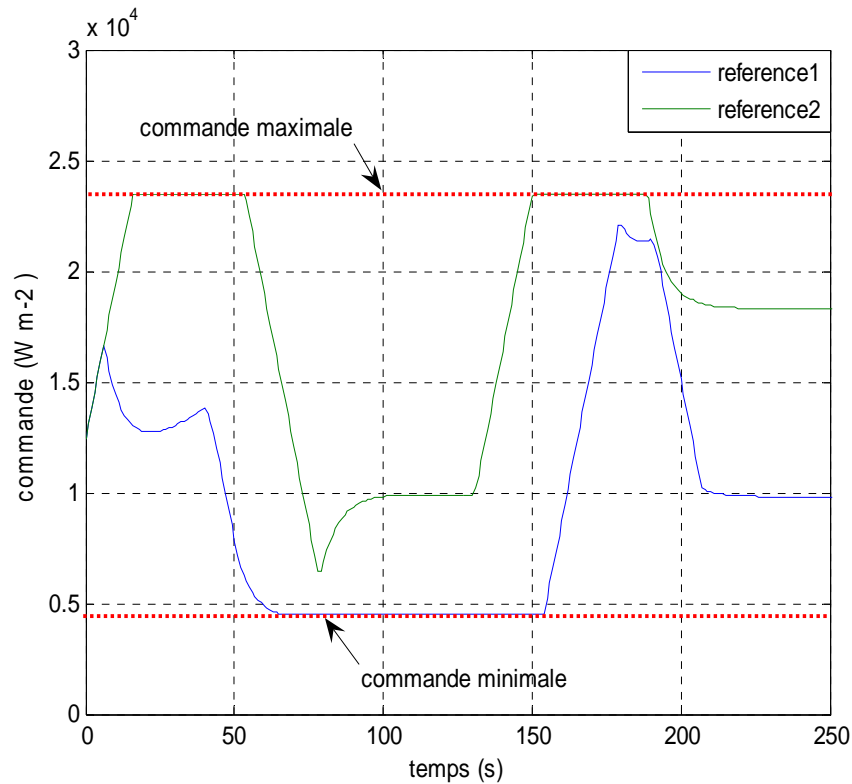


Fig. 8– contrainte sur amplitude de commande

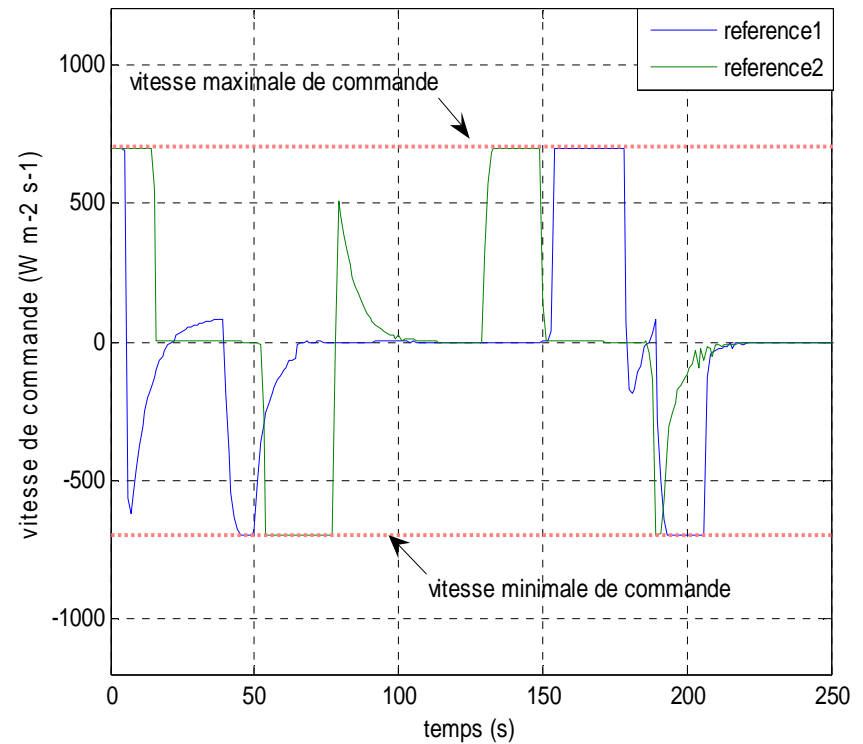


Fig. 9– contrainte sur la vitesse de commande

les contraintes sur la commande sont vérifiées

Réalisation de MPC en simulation

Contraintes sur la sortie

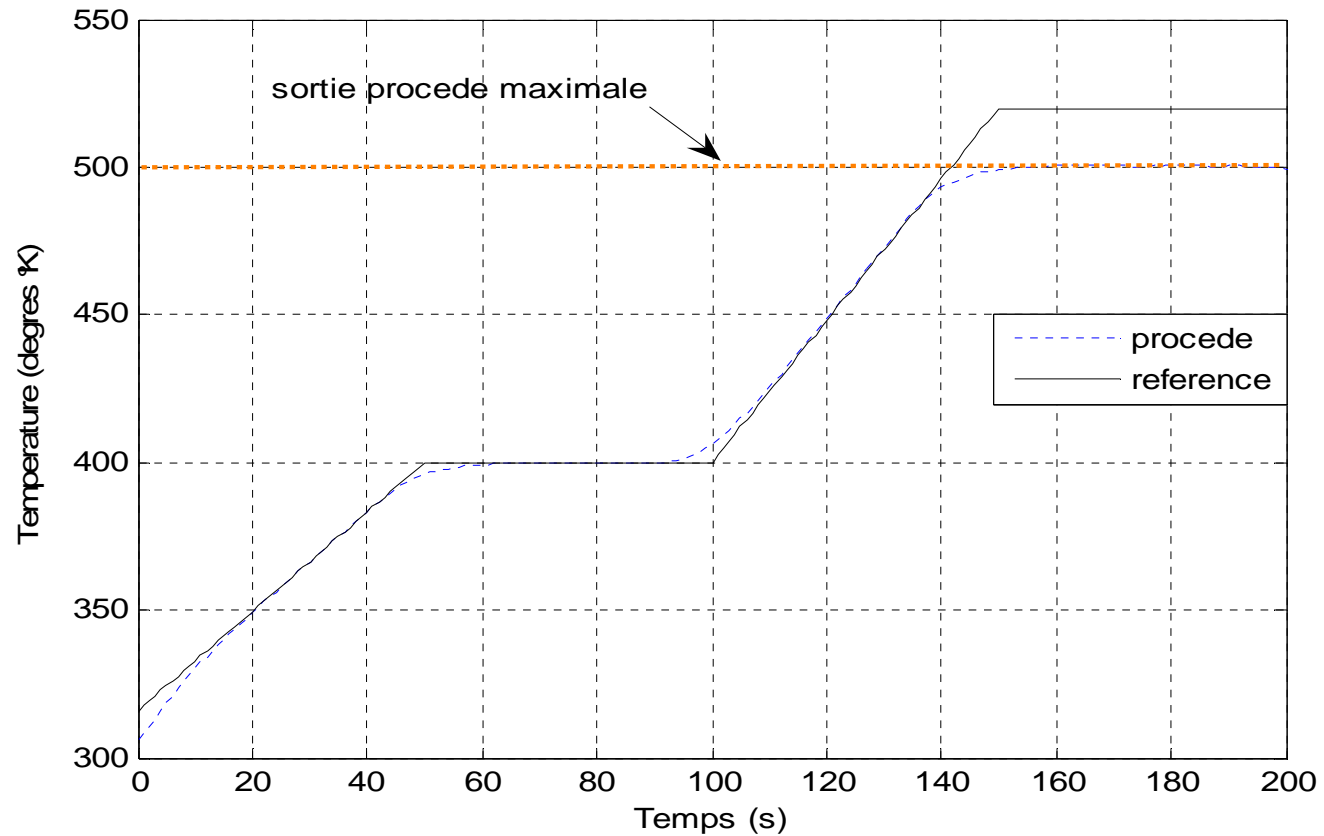


Fig.10 – contrainte sur la sortie

la contrainte sur la sortie est vérifiée

Conclusion et Perspectives

Conclusion :

- *MPC est un Problème d'optimisation*
- *La robustesse et l'efficacité des simulations*

Perspectives :

- *remplacer le critère d'optimisation par un autre qui maximise la vitesse de réaction*
- *Validation expérimentale*



Je vous remercie de votre attention