



**HAL**  
open science

## Contrôle expérimental du séchage de peinture

Mohamed-Chaker Larabi

► **To cite this version:**

Mohamed-Chaker Larabi. Contrôle expérimental du séchage de peinture. Automatique / Robotique. 1999. dumas-00353832v2

**HAL Id: dumas-00353832**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00353832v2>**

Submitted on 28 Jan 2009

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

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

**Mohamed Larabi<sup>1</sup>,  
« Contrôle expérimentale du séchage de peinture »,  
rapport de stage de fin d'études de  
DEA Automatique Industrielle,  
UCBL1, 1998-1999**

**Advisors : Pascal Dufour<sup>1</sup>, Pierre Laurent<sup>1</sup>, Denise Blanc<sup>1</sup>**

**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 GENie 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>

---

# CHAPITRE I

## INTRODUCTION

---

*“ Non la science n'est pas une illusion, mais ce serait une illusion de croire que nous puissions trouver ailleurs ce qu'elle ne peut pas nous donner.”*  
**FREUD** (*L'avenir d'une illusion*)

Ce travail se place dans le domaine de la commande des systèmes à paramètres répartis régis par des équations aux dérivées partielles non linéaires.

Il s'agit de valider expérimentalement une approche de commande étudiée au sein du LAGEP [3] en l'appliquant sur un procédé qui permet le séchage par infrarouge d'une enduction.

Dans ce cadre, on se propose de déterminer la commande optimale à appliquer au procédé afin de réaliser la poursuite asymptotique d'une trajectoire de consigne de température fixée d'avance.

Pour cela, une commande prédictive sous contraintes a été adoptée, en considérant le cas non linéaire et en procédant par une linéarisation autour d'une trajectoire d'équilibre qui permet de ramener notre problème au cas linéaire.

Ce présent rapport s'articule autour de quatre chapitres. Dans le premier chapitre nous décrivons la commande prédictive en rappelant ses principaux concepts ainsi que la structure de commande par modèle interne (CMI) utilisée.

Le second chapitre permet de rappeler les lois fondamentales qui gouvernent le séchage infrarouge appliqué au séchage de matériaux en couche mince.

Nous présentons le modèle du procédé sur lequel se fait ainsi que les essais réels effectués en implémentant sur le procédé l'algorithme de commande en vue du pilotage en temps réel.

---

# CHAPITRE II

## LA COMMANDE

---

*“ Ce n'est pas assez de faire des pas qui doivent un jour conduire au but, chaque pas doit être lui-même un but en même temps qu'il nous porte en avant.”*

**GOETHE** (*conversations, 1823*)

Dans ce chapitre, nous essayons de donner les principaux concepts de la commande prédictive, afin de mieux cerner les principales difficultés rencontrées dans le domaine de la commande.

### **1- Présentation générale :**

L'idée d'une telle commande est apparue dans les années 1960 et ne cesse de s'affirmer et de séduire les spécialistes surtout avec le développement des calculateurs. Son principe est de tenir compte du contexte du procédé commandé et de son évolution future.

L'un des premiers à introduire la commande prédictive est Propoi en 1963, et ce en introduisant dans la boucle de retour un élément prédictif, constitué par le modèle du procédé à commander. Cette étape n'a constitué que la naissance d'une nouvelle philosophie de commande et il fallait attendre les années 1970 pour faire un fondement de la théorie en définissant clairement le concept avec sa validation expérimentale

## 2- Principe de base de la commande prédictive :

Les commandes prédictives se basent sur la connaissance a priori du comportement du procédé par l'intermédiaire d'un modèle. La prédiction de l'évolution des sorties est assurée par le modèle qui représente l'organe essentiel de la structure.

S'il existe de nombreuses approches ou variantes, la plupart des travaux sur la commande prédictive ont en commun les points suivants :

- ✓ Un **modèle** du procédé à commander.
- ✓ Un **critère d'optimisation** formulant les objectifs de commande en traduisant le cahier des charges (trajectoire de référence par exemple).
- ✓ Une **méthode de résolution** pour déterminer la commande optimisant le critère.

De plus elle présente un atout majeur pour l'application dans le domaine industriel : les contraintes peuvent être prises en compte explicitement dans la synthèse de la loi de commande, ces contraintes peuvent être physiques : « par exemple une concentration est toujours positive, une température comprise dans une certaine plage de fonctionnement », elles peuvent être d'exploitation ce qui représente les limites du matériel utilisé.

## 3- Eléments communs

Afin de mieux comprendre et utiliser pleinement les possibilités de la commande prédictive, il faut définir le rôle de chacun des éléments communs.

### a- Le modèle :

Il permet d'estimer l'évolution prévisible des variables de sorties en fonction des entrées présentes ou futures, il est aussi considéré comme un élément indispensable pour mieux connaître et maîtriser le procédé, sans oublier qu'il est parfois difficile de l'élaborer à cause de la complexité du procédé, et qu'une erreur au niveau de la modélisation entraîne une commande erronée.

L'établissement d'un modèle peut se faire de différentes manières :

- Par connaissance des phénomènes en jeu (chimiques, physiques) : élaboration du modèle à partir de l'écriture d'un bilan qui mène vers des équations différentielles ordinaires ou partielles.
- Par identification : le modèle de type boîte noire, est établi à partir d'un fichier de couples de points entrées-sorties, les équations obtenues n'ont à priori aucune signification physique.

### **b- Le critère d'optimisation :**

La définition du critère d'optimisation conditionne fortement la résolution du problème de commande prédictive. Ce critère est généralement composé :

- d'une partie relative à la poursuite de trajectoire.
- d'une partie concernant la pénalisation issue du cahier des charges (contraintes).
- D'une partie de pénalisation relative à la mise en œuvre (temps de calcul, stabilité).

Les parties citées ci-dessus font intervenir soit la commande, soit l'état. On est donc amené à définir un horizon de commande et un horizon de prédiction, le choix de leur valeurs étant un des problèmes pratiques majeurs de la commande prédictive.

Ainsi, si d'un point de vue théorique, un horizon de prédiction infini est très attractif, par souci d'applicabilité, on se restreint toujours à un horizon de prédiction fini.

L'horizon de commande peut être pris égal ou supérieur à une période d'échantillonnage mais toujours inférieurs à l'horizon de prédiction.

### **c- La méthode de résolution :**

Elle permet de trouver une solution au problème d'optimisation sous contraintes. Selon la complexité du problème, cette solution peut être explicite ou approchée par une méthode de programmation linéaire ou non linéaire.

Les problèmes pratiques sont généralement liés à la résolution du modèle non linéaire et de l'optimisation sous contraintes qui doivent être effectués à chaque période d'échantillonnage. Il s'ensuit que le temps de calcul et la vérification des contraintes à tout

instant sont des facteurs importants pour l'application en temps réel de la commande prédictive.

#### 4- Formulation du problème

En général, les procédés physique peuvent être décrit par un ensemble d'équations aux dérivées partielles linéaires ou non linéaires. Sous certaines hypothèses comme leurs indépendance vis à vis des variables spatiales par exemple, ces systèmes là peuvent être modélisé par des équations différentielles ordinaires. Dans le cas de certains procédés, on se trouve cependant obligé de prendre en compte les effets spatiaux.

L'étude de tels procédés requière des outils théorique de dimension infinie, et pour des raisons de simplicité, les équations aux dérivées partielles sont approximés par des équations linéaires ou des équations en dimension finie. Dans ce cas, une commande de dimension finie peut être utilisée.

Même si la théorie de commande des systèmes à paramètre répartis, l'application réelle d'une telle commande reste de loin moins évidente.

On considère la classe des SPR (systèmes à paramètres répartis) à une dimension spatiale décrite par l'ensemble d'équations suivantes:

$$(S_{NL}) \left\{ \begin{array}{l} \omega_t(z, t) = A(\omega(z, t)) + B(\omega(z, t))u(t) \text{ pour } (z, t) \in \Gamma_d = (]0, L[, \mathfrak{R}^{+*}) \\ y_m(t) = C\omega(z, t) \text{ pour } (z, t) \in \Gamma_0 = ([0, L], \mathfrak{R}^{+*}) \\ \text{Conditions aux limites} \\ D(\omega(z, t=0)) \text{ pour } (z, t) \in \Gamma_b = (\{0, L\}, \mathfrak{R}^{+*}) \\ \text{conditions initiales} \\ \omega(z, 0) = \bar{\omega}_0(z) \text{ pour } (z, t) \in \Gamma_i = ([0, L], 0) \end{array} \right. \quad (1)$$

$\omega(z, t)$  représente la variable d'état définie dans l'espace d'hilbert,  $u(t)$  est la variable de commande dans  $\mathfrak{R}^m$  et  $y_m(t)$  représente la variable de sortie dans  $\mathfrak{R}^p$ . A, B et D sont des opérateurs non-linéaires qui dépendent de l'état  $\omega(z, t)$  et C est un opérateur linéaire de sortie borné.



**a - Hypothèse 1 :**

Le modèle non-linéaire ( $S_{NL}$ ) est régulier, c'est-à-dire que pour une condition initiale  $\bar{\omega}_0(z)$  et une variable de commande  $u(t)$ , une solution unique  $\bar{\omega}(z,t)$  doit exister et donc une sortie unique  $y_m(t)$ .

On prend  $y_0(t)$  la sortie nominale du SPR non-linéaire ( $S_{NL}$ ) qui correspond à la trajectoire nominale ( $u_0(t), \bar{\omega}_0(z)$ ).

Le système nominale s'écrit :

$$(S_0) \begin{cases} \omega_{0t}(z,t) = A(\omega_0(z,t)) + B(\omega_0(z,t))u_0(t), (z,t) \in \Gamma_d \\ y_0(t) = C\omega_0(z,t), (z,t) \in \Gamma_0 \\ D(\omega_0(z,t)) = 0, (z,t) \in \Gamma_b \\ \omega_0(z,0) = \bar{\omega}_0(z), (z,t) \in \Gamma_i \end{cases} \quad (2)$$

A partir des équations aux dérivées partielles non-linéaires, on définit le modèle linéarisé temps variant suivant :

$$(S_{LTV}) \begin{cases} \Delta\omega_t(z,t) = A_L(t)\Delta\omega(z,t) + B_L(t)\Delta u_0(t), (z,t) \in \Gamma_d \\ \Delta y_m(t) = C\Delta\omega(z,t), (z,t) \in \Gamma_0 \\ D_L(t)\Delta\omega(z,t) = 0, (z,t) \in \Gamma_b \\ \Delta\omega(z,0) = 0, (z,t) \in \Gamma_i \end{cases} \quad (3)$$

$A_L(t)$ ,  $B_L(t)$  et  $D_L(t)$  sont des opérateurs linéaires temps variant obtenu par la linéarisation des opérateurs non linéaires A, B et D autour de la trajectoire nominale.

**b- Hypothèse 2 :**

Le modèle linéarisé temps variant  $S_{LTV}$  est commandable.

L'objectif de la commande est de déterminer la variable de commande  $u(t)$  de telle sorte que la sortie du procédé suivra la référence optimale. Il reste donc de trouver la variation de la commande  $\Delta u(t)$  tel que

$$y_m(t) = y_0(t) + \Delta y_m(t) = C(\omega_0(z,t) + \Delta\omega(z,t)) \quad (4)$$

est la solution correspondante au système non linéaire  $S_{NL}$  avec  $u(t) = u_0(t) + \Delta u(t)$ . Cependant, les procédés réels sont souvent sujet à des entrées et des sorties ayant des

contraintes, comme les limitations physiques des actionneurs, etc. Une commande prédictive avec modèle paraît bien adaptée pour ce genre de problèmes contraints.

**Commande prédictive non linéaire :**

Considérons le principe de base de la structure de commande par modèle interne CMI représenté ci-dessous :

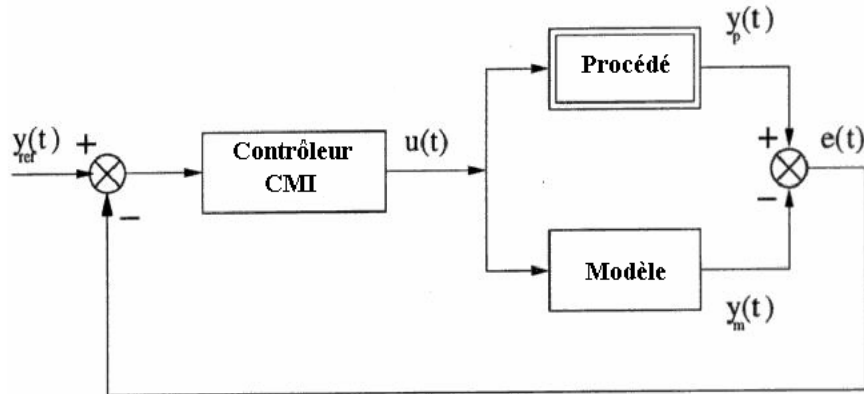


Figure 1 : Structure de commande par modèle interne

Le contrôleur CMI a le rôle de générer la commande  $u(t)$  qui permet à  $y_p(t)$  de suivre une trajectoire de référence  $y_{ref}(t)$ . Ce dernier peut être une loi de commande explicite (PI par exemple) pour un système à paramètres répartis (SPR) linéaire invariant dans le temps. Pour les système non linéaire, l'approche la plus appropriée est la procédure indirecte où la loi de commande CMI est non explicite. Le problème de commande est retranscrit en un problème d'optimisation et le contrôleur CMI est alors un algorithme d'optimisation. Pour le problème de commande dressé ici, nous utilisons une approche par CMI indirecte combinée avec un SPR non linéaire et un SPR linéarisé temps variant :

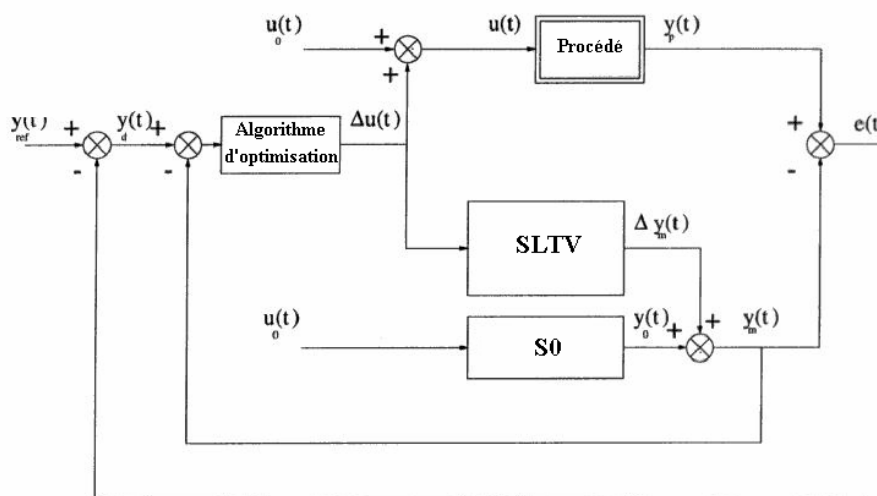


Figure 2 : Structure de commande par modèle interne linéarisé

En accord avec la structure de commande décrite précédemment, on peut écrire :

$$\begin{aligned} y_d(t) &= y_{ref}(t) - e(t) \\ y_d(t) &= y_{ref}(t) - (y_p(t) - y_m(t)) \\ y_d(t) - y_m(t) &= y_{ref}(t) - y_p(t) \end{aligned} \quad (5)$$

Rapprocher aussi que possible la sortie du procédé  $y_p(t)$  de la référence  $y_{ref}(t)$  revient à minimiser la différence entre le profile désirée  $y_d(t)$  et la sortie du modèle prédictif  $y_m(t)$ .

La commande par modèle prédictif appelée aussi commande à horizon fuyant est devenu une stratégie très attractive pour la commande des procédés non linéaires qui sont sujet à des contraintes sur les entrées et les états. Plusieurs formulations ont été faites dans la littérature pour les systèmes linéaires ou non linéaires régis par des EDO (équations différentielles ordinaires). En CMP, le contrôleur prédit le comportement sur un horizon de prédiction en utilisant le modèle et les mesures disponibles.

Le but étant de déterminer une séquence de vecteurs d'entrée qui optimise un indice de performance sur un horizon fini. De plus, cette stratégie permet de prendre en compte explicitement des contraintes dans l'écriture du problème. Afin de simplifier la détermination de la loi de commande, un cadre de recherche en temps discret est utilisé. Le problème de poursuite est écrit comme un problème d'optimisation sous contraintes :

$$(P_0) \begin{cases} \min_{\tilde{u}} J(\tilde{u}) \text{ avec :} \\ \tilde{u} = [u(k), \dots, u(k + N_C - 1)]^T \\ J(\tilde{u}) = \frac{1}{2} \sum_{j=k+1}^{k+N_p} [y_d(j) - y_m(j)]^T Q [y_d(j) - y_m(j)] \end{cases} \quad (6)$$

Avec des contraintes (d'amplitude et de vitesse) sur les variables de commande :

$$(C_1) \begin{cases} u_{\min} \leq u_0(j) + \Delta u(j) \leq u_{\max} \\ \dot{u}_{\min} \leq \dot{u}_0(j) + \Delta \dot{u}(j) \leq \dot{u}_{\max} \\ j \in \Pi = \{k, k + 1, \dots, k + N_C - 1\} \end{cases} \quad (7)$$

Où

$$(D) \left\{ \begin{array}{l} J(\tilde{u}) \text{ est l'indice de performance,} \\ T_e \text{ est la période d'échantillonnage,} \\ u_0(j) \text{ est l'entrée du modèle non linéaire à } t = jT_e, \\ \dot{u}_0(j) \text{ est la vitesse de l'entrée du modèle non linéaire à } t = jT_e, \\ u(j) = u_0(j) + \Delta u(j) \text{ est l'entrée du procédé à } t = jT_e, \\ y_m(j) \text{ est la sortie du modèle prédictif à } t = jT_e, \\ y_d(j) \text{ est la sortie désirée à } t = jT_e, \\ Q \text{ est une matrice définie positive,} \\ N_c \text{ horizon de commande} \\ N_p \text{ horizon fuyant fini, } N_p \geq N_c \end{array} \right.$$

Quelque soit le temps  $t$ , les contraintes peuvent être écrit en utilisant les fonctions suivantes :

$$(C_2) \left\{ \begin{array}{l} C_1(u) = u_{\min} - (u_0 + \Delta u) \leq 0 \\ C_2(u) = (u_0 + \Delta u) - u_{\max} \leq 0 \\ C_3(u) = \dot{u}_{\min} - (\dot{u}_0 + \Delta \dot{u}) \leq 0 \\ C_4(u) = (\dot{u}_0 + \Delta \dot{u}) - \dot{u}_{\max} \leq 0 \end{array} \right. \quad (8)$$

Ensuite le problème est traité comme :

$$(P) \left\{ \begin{array}{l} \min_{\tilde{u}} J(\tilde{u}) \\ c_i(u(j)) \leq 0 \quad i \in I = \{1 \text{ à } nbc\}, j \in \Pi \end{array} \right. \quad (9)$$

### c- Hypothèse 3 :

A tout moment, le domaine  $U = \{u(j) | c_i(u(j)) \leq 0, i \in I, j \in \Pi\}$  n'est pas vide.

### d- Hypothèse 4 :

Les contraintes  $c_i$  sont deux fois dérivables.

### Remarque :

Le problème d'optimisation non linéaire sous contraintes est résolu à chaque période d'échantillonnage. Uniquement la première commande de la séquence  $[u(k), \dots, u(k + N_c - 1)]^T$  est effectivement appliquée et la procédure est réitéré à la prochaine période d'échantillonnage avec la nouvelle mesure de l'évolution du procédé.

## 5- Optimisation sous contraintes :

La résolution du problème d'optimisation sous contrainte constitue le majeur désavantage des commandes par modèle prédictif non linéaire. Pour les applications en temps réels, la solution doit être disponible à tout moment.

Les contraintes les plus « dures » doivent être satisfaites à chaque itération et le temps de calcul doit être inférieur à la période d'échantillonnage.

Pour satisfaire les exigences de la commande, nous adoptons une méthode de programmation non linéaire mixte. Elle combine une loi de transformation [10] et la méthode pénalités externes [7] et l'algorithme de Levenberg-Marquardt.

Les contraintes sont éliminées du problème par l'introduction d'une fonction de pénalités dans l'indice de performance initial. l'indice de performance devient :

$$\begin{aligned}
 J_{tot}(\tilde{u}, p) &= J(\tilde{u}) + J_{ext}(\tilde{u}, p) \\
 J(\tilde{u}) &= \frac{1}{2} \sum_{j=k+1}^{k+N_p} [y_d(j) - y_m(j)]^T Q [y_d(j) - y_m(j)] \\
 J_{ext}(\tilde{u}, p) &= \max^2(0, c_3) + \max^2(0, c_4)
 \end{aligned} \tag{10}$$

Le problème de l'optimisation sous contraintes (P) est reformulé en le problème d'optimisation pénalisé suivant :

$$(P_p) \left\{ \min_{\tilde{u}} J_{tot}(\tilde{u}, p) \right. \tag{11}$$

Le problème pénalisé peut être résolu par n'importe quel algorithme d'optimisation sans contraintes. On choisit l'algorithme de Levenberg-Marquardt car il est connu pour sa robustesse et son efficacité.

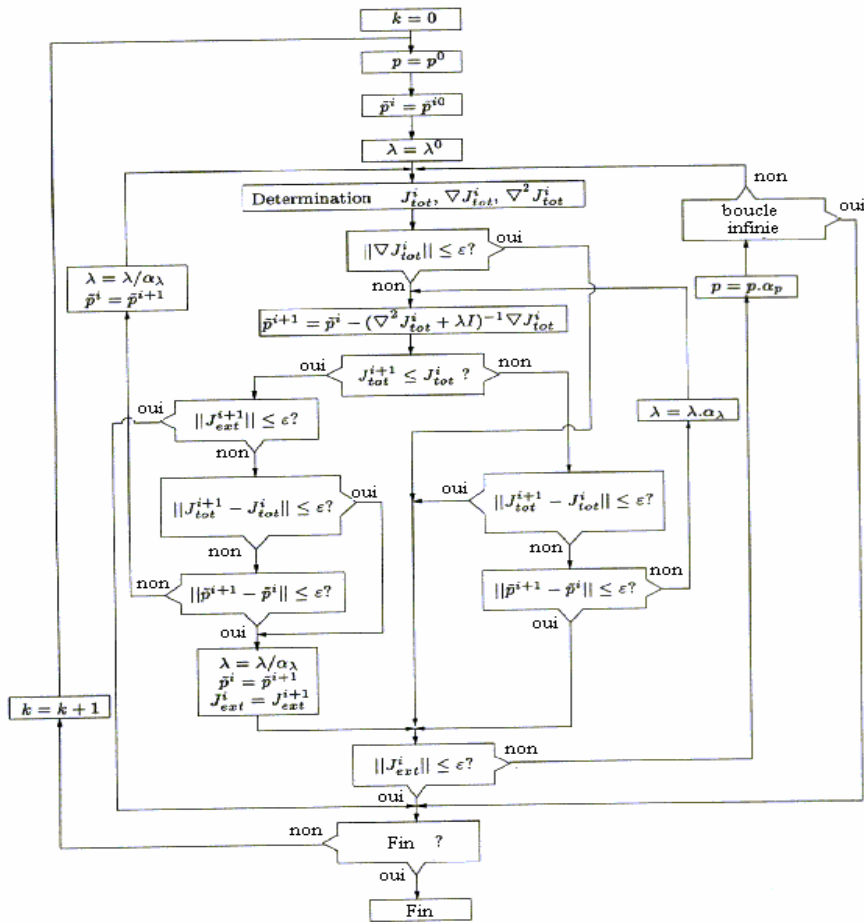


Figure 3 : Algorithme de Levenberg-Marquardt modifié

---

# CHAPITRE III

## LE SÉCHAGE INFRAROUGE

### Application au séchage de peintures

---

*“ Je crois qu'on ne peut mieux vivre qu'en cherchant à devenir meilleur, ni plus agréablement qu'en ayant la pleine conscience de son amélioration. ”*

*SOCRATE (cité par Xénophon)*

Nous allons dans ce chapitre rappeler les principales lois physiques qui gouvernent le séchage. Ensuite, nous présenterons le rayonnement infrarouge et nous citerons les domaines industriels dans lesquels le séchage infrarouge est utilisé.

### **I- Lois physiques gouvernant le séchage**

#### **1- Définitions fondamentales**

##### **1.1-Grandeurs utilisées dans le séchage**

###### a. Teneur en eau ou humidité du solide

L'humidité ou la teneur en eau du matériau solide peut s'exprimer de différentes manières. Si nous considérons un milieu constitué de trois phases :

gaz ( $m_g, V_g$ )
liquide ( $m_e, V_e$ )
solide ( $m_s, V_s$ )

nous pouvons donner les définitions suivantes :

- Humidité en base humide : 
$$x = \frac{m_e}{m_e + m_s} \quad (1)$$

- Humidité en base sèche : 
$$X = \frac{m_e}{m_s} \quad (2)$$

- Teneur volumique en eau : 
$$\theta = \frac{V_e}{V_e + V_g + V_s} \quad (3)$$

- Saturation en liquide : 
$$S = \frac{V_e}{V_e + V_g} \quad (4)$$

En fait, en séchage, l'humidité en base sèche, notée  $\chi$  est le plus souvent utilisée.

### b. Vitesse de séchage

Une expérience de séchage consiste à enregistrer la perte de masse au cours du temps. La pesée peut être réalisée de manière continue ou de manière discontinue. Après étuvage, lorsqu'on connaît la masse sèche  $m_s$ , on trace l'humidité moyenne,  $\bar{X} = \frac{m_e}{m_s} = f(t)$ . La pente de cette courbe correspond à une vitesse de perte d'humidité qui s'exprime en kg d'eau évaporée par unité de masse de solide sec et par unité de temps (%.s-1). La vitesse ou cinétique de séchage s'exprime également en kg d'eau évaporée par unité de surface exposée et par unité de temps (kg.m-2.s-1). Elle est notée  $\dot{m}$ , telle que :

$$\dot{m} = -\frac{1}{A} \frac{dm_e}{dt} \quad (5)$$

Cette vitesse est souvent représentée en fonction de l'humidité moyenne résiduelle.



$$\dot{m} = -\frac{\rho_s^0}{a} \frac{d\bar{X}}{dt} \quad (6)$$

avec  $\rho_s^0$  : masse volumique apparente du solide sec,

a : surface spécifique du matériau sec  $a=A_{\text{sec}}/V_{\text{sec}}$  ( $\text{m}^2/\text{m}^3$ ) supposée constante.

## 1.2- Activité de l'eau

La nature de la liaison des molécules d'eau modifie la pression partielle de la vapeur  $P_v$  en équilibre avec le produit . Cette influence est représentée par la notion d'activité de l'eau notée,  $a_w$  définie par :

$$a_w = \frac{P_v}{P_{v\text{sat}}} \quad (7)$$

où  $P_{v\text{sat}}$  est la pression de vapeur saturante de l'eau pure à la température du produit.

## 1.3- Les différentes phases de séchage

Lorsqu'on analyse une courbe de séchage, trois phases peuvent être distinguées :

- **Phase 1** : C'est la phase de mise en régime, qui correspond à une montée en température de l'échantillon jusqu'à une valeur d'équilibre. La vitesse de séchage qui est directement fonction de la température de surface du produit suit la même évolution.
- **Phase 2** : Cette phase isenthalpique correspond à une décroissance linéaire de la teneur en eau, une vitesse de séchage et une température de produit à peu près constantes. L'évaporation a lieu à la surface du produit qui reste saturée en eau liquide. En fait, la vitesse de séchage par unité de surface séchée est la même que la vitesse d'évaporation d'un film d'eau pure dans les mêmes conditions de température, de vitesse d'air et d'humidité. Cette phase persiste tant que le mouvement d'eau liquide à l'intérieur du matériau maintient la surface saturée. Il existe une humidité critique  $\chi_{\text{cr}}$  au-delà de laquelle la vitesse de séchage diminue.
- **Phase 3** : Elle débute à partir de  $\chi_{\text{cr}}$ , lorsque la surface s'assèche car la migration interne de l'eau liquide est ralentie. La vitesse de séchage diminue et la température du produit augmente. En fait, pour les produits poreux, un front d'évaporation apparaît, séparant le produit en une zone supérieure sèche (ou dans le domaine hygroscopique) et une zone

inférieure humide contenant toute l'eau non liée. La vapeur d'eau se forme au niveau du front puis migre à travers la zone sèche par diffusion ou sous l'effet des forces de pression.

- Si le produit n'est pas hygroscopique, la vitesse de séchage s'annule pour une humidité finale nulle.
- Par contre, pour les autres systèmes, un nouveau changement de régime apparaît lorsque toute l'eau libre a disparu du solide. Il correspond à l'élimination de l'eau physiquement liée. La vitesse de séchage s'annule alors pour une humidité non nulle  $\chi_{eq}$  traduisant l'équilibre du produit avec les conditions extérieures.

## 2- Modélisation du mouvement de l'eau au cours du séchage

L'élimination de l'eau à l'extérieur du matériau se fait sous forme vapeur. Son évaporation a lieu soit à la surface, soit dans le produit (présence d'un front d'évaporation). L'eau migre sous plusieurs formes :

- migration de l'eau liquide : soit sous l'effet d'un gradient de pression totale ou de la gravité: loi de Darcy ; soit sous l'effet d'un gradient d'humidité : loi de Fick ou d'un gradient de température (thermomigration), soit sous l'effet couplé de ces trois actions ;
- migration de l'eau vapeur sous l'effet d'un gradient de concentration ou de température ou sous l'effet d'un gradient de pression.

Dans le cas du séchage à faible température, les gradients de pression totale peuvent être négligés, ce qui revient à considérer un modèle avec seulement deux gradients moteurs : la température et la concentration en eau.

Si l'on travaille à l'échelle du produit, alors la variation de l'humidité interne locale, notée  $\chi$ , est obtenue par intégration de l'équation de bilan (Lewis et Sherwood) :

$$\frac{\partial \rho_s X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( D \frac{\partial \rho_s X}{\partial z} \right) \quad (8)$$

avec  $D$  : coefficient de diffusion global ou diffusivité apparente de l'eau dans le produit ; ce coefficient intègre les différents mécanismes de transfert de l'eau vus ci-dessus.

A la surface du produit ( $z = 0$ ), le flux d'évaporation est égal à la vitesse de séchage, de sorte que :

$$\dot{m} = -\rho_s D \left( \frac{\partial X}{\partial z} \right)_{z=0} \quad (9)$$

Beaucoup d'interprétations admettent que la diffusivité apparente D est une constante. Cependant, pour certains matériaux, ce coefficient dépend fortement de ses caractéristiques à travers la température et la teneur en eau locale :

$$D=f(\chi,T) \quad (10)$$

Du fait des non linéarités introduites par cette relation dans l'équation 8, les solutions analytiques ne sont plus possibles et le système sera résolu à l'aide de méthodes numériques plus ou moins sophistiquées. Après avoir choisi la forme de la fonction f( $\chi$ ,T), les différents auteurs ont identifié les coefficients de cette relation empirique à partir des courbes expérimentales de séchage,  $\bar{\chi} = f(t)$ .

L'influence de la température est le plus souvent représentée par une loi de type Arrhénius :

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E_{ad}}{RT}\right) \quad (11)$$

avec  $E_{ad}$  : énergie d'activation liée à la diffusion de l'eau dans le produit.

L'influence de l'humidité est représentée indépendamment de celle de la température soit par une loi polynomiale : Andrieu et coll. pour le séchage de pâtes, Kechaou pour le séchage d'un gel chimique de type polyacrylamide, soit par une loi de type exponentielle: Kechaou pour le séchage d'un gel physique , Navarri pour le séchage d'une solution d'alcool polyvinylique :

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{a}{\chi}\right) \quad (12)$$

## II- Le rayonnement infrarouge

### 1- Définitions

Le rayonnement infrarouge est un mode de transfert d'énergie qui à la différence de la conduction ou de la convection ne nécessite pas de support physique. Il est souvent utilisé

dans certains procédés de séchage. En fait, lorsqu'on utilise le rayonnement infrarouge, on souhaite obtenir une qualité au moins équivalente à celle obtenue avec les modes de transfert classiques tout en consommant moins d'énergie. En effet, il s'avère que lorsqu'on rapporte les dépenses d'énergie à la masse de produit traité, le rayonnement infrarouge apporte des avantages par rapport à la conduction et à la convection. Toutefois, il est très courant d'associer le rayonnement infrarouge à une technologie plus conventionnelle, le plus souvent à la convection.

Dans le domaine infrarouge qui correspond à des longueurs d'ondes comprises entre 0,76 et 15  $\mu\text{m}$ , nous pouvons distinguer trois secteurs suivant la température des émetteurs:

- **l'infrarouge court (IRC)** : les émetteurs sont constitués d'un filament de tungstène placé dans un tube sous vide ou sous atmosphère inerte et porté à très haute température (2000 - 2500 °C) ; le maximum d'émission monochromatique est situé autour de 1,2  $\mu\text{m}$ , la gamme de l'IRC s'étendant de 0,76 à 2  $\mu\text{m}$  ;

- **l'infrarouge moyen (IRM)** : les émetteurs sont composés de résistances en alliages usuels (Nickel-Chrome ou Fer-Chrome-Aluminium), portées à une température comprise entre 800°C et 1200 °C, ce qui correspond à une gamme de longueur d'onde comprise entre 2 et 4  $\mu\text{m}$  ;

- **l'infrarouge long (IRL)** : est moins utilisé en séchage compte tenu du temps de réponse élevé des émetteurs. La température est inférieure à 800 °C et le spectre est compris entre 4 et 15  $\mu\text{m}$ .

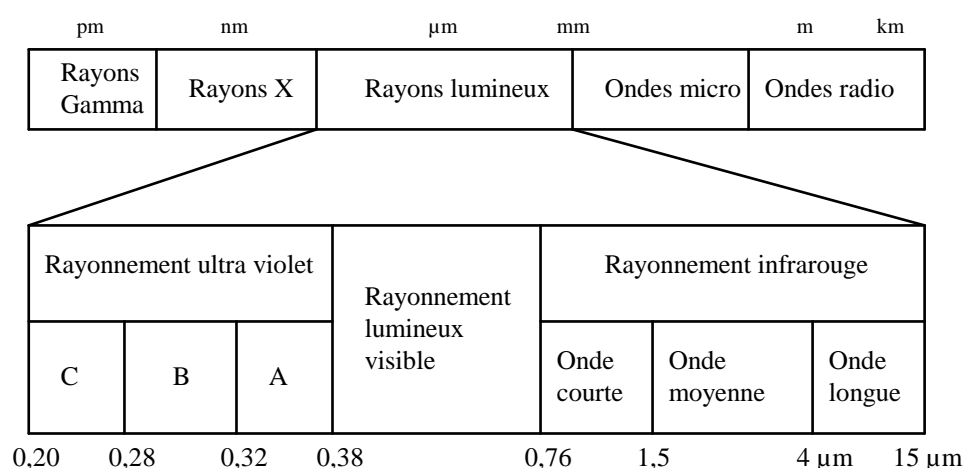


Figure 1 : Spectre électromagnétique d'après.

## 2- Avantages et limites

Le rayonnement infrarouge présente certains avantages liés à l'efficacité de ce mode de transfert de l'énergie.

- Le transfert de l'énergie est direct, à distance, sans la nécessité de support matériel (fluide...), contrairement à la convection ou la conduction. Le produit à sécher ne peut donc pas être dégradé chimiquement (oxydation) ou pollué (poussières).
- Les densités de puissance utilisables peuvent être bien plus élevées qu'avec les techniques traditionnelles d'échange convectif (plusieurs dizaines à centaines de  $\text{kW.m}^{-2}$ ) car la différence de température entre la source et le produit à sécher peut être très grande, les vitesses de traitement seront d'autant plus élevées.
- L'absorption d'énergie peut se faire progressivement avec la pénétration du rayonnement dans la masse du solide, assurant ainsi une bonne homogénéité de chauffage de certains produits disposés en couche mince.
- L'énergie rayonnée peut être focalisée, dirigée ou réfléchie, ce qui accroît sa souplesse et ses performances d'utilisation.
- L'inertie thermique d'un tel système est généralement faible (surtout en infrarouge court). Cela se traduit par de courtes périodes de mise en régime provoquant un gain de temps, donc de productivité et d'énergie. La régulation du procédé en est d'autant facilitée, les temps de réponse étant faibles.

Nous pouvons toutefois trouver deux limites à l'installation d'un procédé de séchage par rayonnement :

- Si le produit est peu absorbant (forte réflectivité ou transmittivité élevée), le rendement de l'opération peut être assez médiocre. Il faut alors essayer d'adapter de façon optimale la longueur d'onde des émetteurs.
- Si le produit n'est pas plan et présente une géométrie complexe, l'éclairement n'est pas uniforme sur toute la surface et des gradients thermiques apparaissent. Il faut alors résoudre des problèmes géométriques complexes d'acheminement du rayonnement à la surface de l'échantillon.

### **III- Le séchage infrarouge**

#### **1- Domaine d'utilisation**

Compte tenu des avantages et limites explicités précédemment, le rayonnement infrarouge est utilisé dans presque tous les secteurs industriels pour sécher un très grand nombre de produits : industrie alimentaire, papetière et, de plus en plus, dans le domaine de l'automobile. Les panneaux infrarouge de par leur faible volume peuvent être installés en tant que « dopage » sur les lignes de séchage, permettant de diminuer les temps de séchage et ainsi d'augmenter la rentabilité et parfois la qualité des produits.

C'est pourquoi, le séchage infrarouge a été étudié expérimentalement et théoriquement par quelques auteurs. Dans un premier temps, ces études étaient plutôt théoriques (échantillons modèles) et ne comportaient pas d'applications industrielles directes. Par exemple, Seki et coll. En 1977 ont étudié le séchage IR de couches de matériaux poreux (billes de verre de différents diamètres). Hasatani et coll. Ont travaillé en 1983 sur le séchage IR de suspensions de graphite et de sable de silice, et ont mis au point un modèle « semi-transparent » qui prend en compte l'absorption du rayonnement par le matériau.

Des études plus récentes utilisant le rayonnement infrarouge montrent les améliorations que peut apporter ce mode de chauffage dans différents domaines industriels. Dostie et coll. Montrent qu'une utilisation intermittente du rayonnement IR par « dopage » d'installations déjà existantes diminue le temps de séchage de matériaux poreux (plaques d'isolation acoustique et thermique) par deux. Nadeau et coll. Grâce à des résultats expérimentaux et théoriques obtenus en laboratoire font des propositions qui ont permis d'améliorer un tunnel industriel de séchage infrarouge.

Dans le domaine de l'industrie papetière, le « dopage » des installations par des panneaux infrarouge permet de diminuer les irrégularités d'humidité dans la largeur de la feuille (papier sans marbrure) et d'améliorer l'imprimabilité du papier.

Pour l'industrie automobile, nous pouvons constater une utilisation du rayonnement infrarouge à différents niveaux : assemblage de la carrosserie, traitement de surface, montage

du véhicule, retouches de peinture sur véhicule fini, etc. De plus, avec l'arrivée des peintures à base aqueuse, l'utilisation de l'infrarouge est renforcée. En fait, dans ce cas, l'infrarouge est utilisé essentiellement pour la mise en température de la caisse.

## 2- Application au séchage des peintures

Le séchage des peintures peut être, soit purement physique, soit physique et chimique (séchage réactif). Dans le premier cas, le solvant diffuse dans un polymère qui ne réagit pas (phénomène de retrait). Par contre, dans le deuxième cas, à l'évaporation des solvants se superpose une réaction de polymérisation (réaction des liants de la peinture). Ce phénomène de séchage chimique très complexe ne semble pas avoir été étudié auparavant. Dans la littérature, nous avons rencontré un certain nombre d'études théoriques et expérimentales, sur le séchage physique de polymères en couche mince. Ces études abordent toutes le problème de la diffusion des solvants dans les polymères.

Sano donne plusieurs exemples de séchage de polymères, en film, en fibre ou en gouttes. Cairncross a modélisé un séchoir industriel (séchage mixte convectif et infrarouge) de peinture, en montrant l'influence des différentes zones à l'intérieur du tunnel de séchage. Vrentas et coll. proposent un modèle de séchage pour un film de polymère en convection ; pour déterminer le coefficient de diffusion, ils proposent d'utiliser la théorie des volumes libres développée par Duda .

En 1994, Okazaki et coll. déterminent le coefficient de diffusion de l'eau dans une couche de PVA (Alcool polyvinylique) en fonction de la concentration (séchage convectif). Ces résultats sont repris par Nishimura et coll. sous rayonnement infrarouge. D'autres auteurs ont également étudié le séchage de solutions de PVA sous rayonnement infrarouge.

Navarri, au cours de ses travaux sur le séchage de solutions de PVA sous rayonnement IR, a montré que l'analogie de Chilton-Colburn reste valable sous rayonnement infrarouge. Il a également développé un modèle diffusif de séchage qui tient compte du retrait du film d'enduction et qui interprète parfaitement les montées en température et les courbes de séchage en fonction du temps.

---

# CHAPITRE IV

## MISE EN OEUVRE

---

*“ Il disait : "Enfin nous avons des instructions", et il pensait : "Nous ne disposons d'aucun moyen mais nous les utiliserons tous".”*

**Constantin-Athanase PYTHAGORIOS**

*Dans ce chapitre nous introduisons le procédé à commander, les contraintes présentes ainsi que la méthode commande adoptée pour une poursuite optimal de la trajectoire de référence.*

### **1- Application de la commande au procédé de séchage :**

Ce procédé tel qu'il a été décrit précédemment permet de sécher un film de peinture étalée sur une plaque métallique par un flux infrarouge.

Ce système est décrit par la température  $T(t)$  et l'humidité  $\chi(z,t)$ .

#### **a- Bilan de masse :**

un modèle de séchage de diffusion permet d'obtenir l'équation suivante :  
pour  $0 < z < e_{\text{sec}}$  :

$$\chi_t = \frac{\partial}{\partial z} [D_{\text{eff}}(\chi,t)\chi_z] \quad (1)$$

Avec Le coefficient de diffusion effective :



$$D_{eff}(\chi, t) = \frac{D_0 \exp\left(\frac{-a}{\chi}\right) \exp\left(\frac{-Ea}{RT}\right)}{(1 + \phi\chi)^2} \quad (2)$$

Où  $D_0$ ,  $a$ ,  $E_a$ ,  $R$  et  $\phi$  sont des constantes positives.

A  $z=0$  :  $\chi_z = 0$

A  $z=e_{sec}$ , le flux d'eau sortant dépend de la vitesse de séchage  $\dot{m}(\bar{\chi}, T)$

$$-D_{eff}(\chi, T)\chi_z = \frac{\dot{m}(\bar{\chi}, T)}{\rho} \quad (3)$$

### b- Bilan d'énergie :

En prenant en compte les différentes pertes  $P_i$  tel que la puissance infrarouge absorbée, nous avons :

$$(\rho C_p(\bar{\chi}, T)e + \rho_s c_s e_s)T_t = -\sum_{i=1}^5 P_i + P_{abs} \quad (4)$$

Où  $\rho C_p(\bar{\chi}, T)e$  et  $\rho_s C_s e_s$  sont respectivement la capacité thermique de la surface de la peinture et la capacité thermique de la surface de la plaque métallique.

Les différentes pertes dues à la convection comme à la radiation sur les deux faces peuvent être exprimées comme suit :

$$(S_1) \begin{cases} P_1 = h_c(T - T_{air}) \\ P_2 = 0.96\sigma(T^4 - T_{air}^4) \\ P_3 = h_c(T - T_{sup}) \\ P_4 = \alpha_s\sigma(T^4 - T_{sup}^4) \end{cases} \quad (5)$$

$P_5$  représente l'énergie de vaporisation et  $P_{abs}$  l'énergie infrarouge qui dépend de la variable de commande, Le flux infrarouge :

$$(S_2) \begin{cases} P_5 = l_v(T)\dot{m}(\bar{\chi}, T) \\ P_{abs} = \alpha_{ir}(\bar{\chi})\varphi_{ir}(t) \end{cases} \quad (6)$$

## 2- Système de commande non linéaire réparti :

En accord avec l'hypothèse de la propriété de l'uniformité spatiale sur la température, le problème de commande est un problème de commande distribué car la commande  $\varphi_{ir}(t)$  agit

instantanément sur la bordure ( $z=e_{\text{sec}}$ ) et sur le film de peinture. Ensuite, le système peut être écrit comme suit :

$$\left. \begin{array}{l}
 \chi_t = F_1(\chi_{zz}, \chi_z, \chi, T) \text{ pour } 0 < z < e_{\text{sec}} \\
 T_t = F_2(\bar{\chi}, T) + F_3(\bar{\chi}, T)\varphi_{ir}(t) \text{ pour tout } z \\
 \bar{\chi}(t) = \frac{1}{e_{\text{sec}}} \int_0^{e_{\text{sec}}} \chi(\xi, t) d\xi \\
 \text{Cond. aux limites} \\
 \chi_z = 0 \text{ en } z = 0 \\
 F_4(\chi_z, \bar{\chi}, \chi(e_{\text{sec}}, t), T) = 0 \text{ en } z = e_{\text{sec}} \\
 \text{Cond. initiales} \\
 \chi(z, 0) = \chi_0 \\
 T(0) = T_0
 \end{array} \right\} (S_{NL}) \quad (7)$$

Dans ce cas, l'objectif de la commande est le suivi d'un profile de température désiré  $T_{\text{ref}}(t)$ , donné à priori, ce profile est choisit pour faire un compromis entre un séchage rapide et une qualité finale du produit.

Ce but peut être atteint par une linéarisation locale autour d'une trajectoire nominale, comme il a été décrit au chapitre II, ceci mène à l'expression du model de la forme  $(S_0)$  et  $(S_{\text{LTV}})$ . De plus la variable de commande,  $\varphi_{ir}(t)$ , est sujet aux contraintes d'amplitude et de vitesse suivantes :

$$(C_3) \left\{ \begin{array}{l}
 0Wm^{-2} \leq \varphi_{ir}(t) \leq 12kWm^{-2} \\
 -500Wm^{-2}s^{-1} \leq \dot{\varphi}_{ir}(t) \leq 500Wm^{-2}s^{-1}
 \end{array} \right. \quad (8)$$

Les conditions initiales et atmosphériques sont :

$$(\Psi) \left\{ \begin{array}{l}
 T_{\text{air}} = 52^\circ C \\
 T_{\text{sup}} = 20^\circ C \\
 \chi_{\text{air}} = 20\% \\
 T_0 = 36^\circ C \\
 \chi_0 = 0.397 \text{ kg / kg}
 \end{array} \right. \quad (9)$$

### 3- Expérimentation

Cette partie est consacré à l'application réelle de la commande prédictive sur le séchoir réel, et en utilisant la peinture époxy-amine à base aqueuse. Nous allons donner les résultats de plusieurs références imposées.

Le passage de la simulation à l'application réelle, ne représente pas une chose facile, car il faut prendre en compte d'autre détails comme les caractéristiques des capteurs, la fiabilité de la chaîne d'acquisition, etc.

Afin d'appliquer notre commande nous avons utilisé un ordinateur personnel qui communique avec le séchoir via une carte d'interface (décrite dans l'annexe), respectant le synoptique suivant :

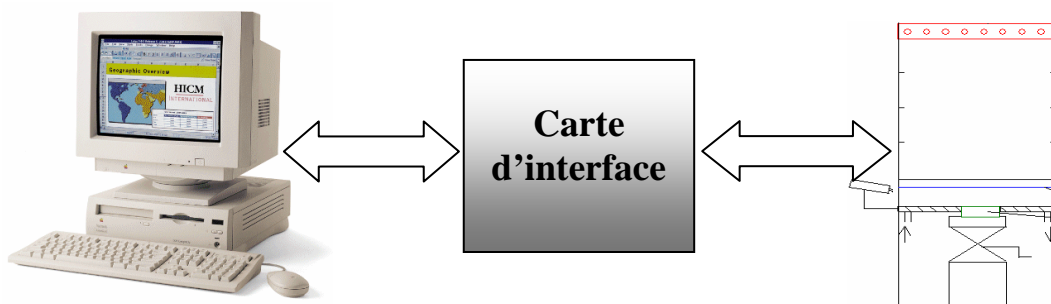


Figure 1 : Synoptique de la commande du séchoir infrarouge

La carte d'interface, nous permet de faire l'acquisition de la température instantanée recueilli par le pyromètre, elle nous permet aussi d'envoyer la commande calculée directement sur l'armoire électrique qui contrôle le flux infrarouge.

Notre programme de commande a été écrit en Visual Fortran, en utilisant une interface en C pour l'accès à la carte d'acquisition et les temporisation, car le langage C a déjà donné ses preuves dans la programmation des interfaces entrées-sorties, chose qui reste difficile à faire en fortran à cause de sa limitation.

Avant de procéder au séchage, il faut vérifier si la température à l'instant initial concorde avec la température initial de la trajectoire. Pour cela, notre programme de commande effectue un test de température. Si la température est inférieure à  $T_0$  (température

initiale), il force un chauffage jusqu'à atteindre  $T_0$ . Dans le cas contraire, il faut attendre le refroidissement du séchoir.

Plusieurs paramètres sont à choisir avant le séchage, il s'agit de la température initiale  $T_0$ , l'horizon de commande  $H_c$ , l'horizon de prédiction  $H_p$ , le temps d'échantillonnage des entrées-sorties  $te-es$ .

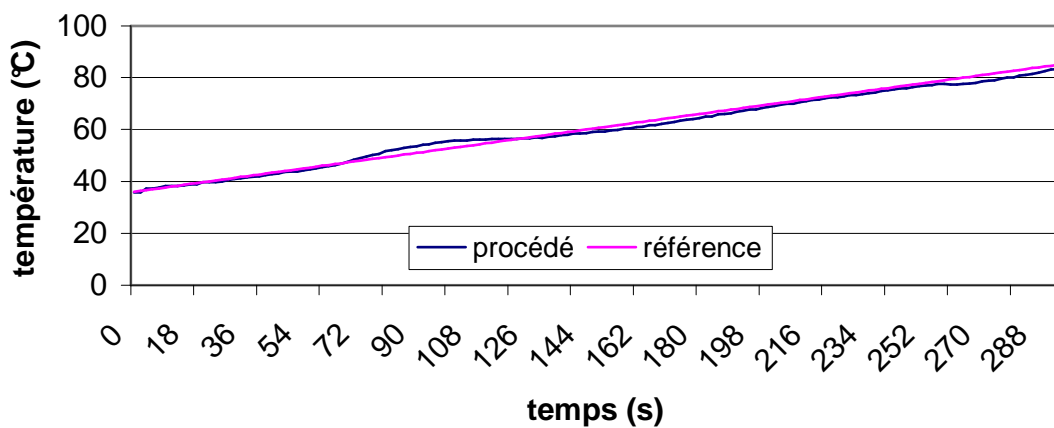
Nous avons effectué plusieurs manipulations, et on s'est aperçu que les meilleures valeurs pour les paramètres cités précédemment sont les suivantes :

$$H_c=1, H_p=5, te-es=2$$

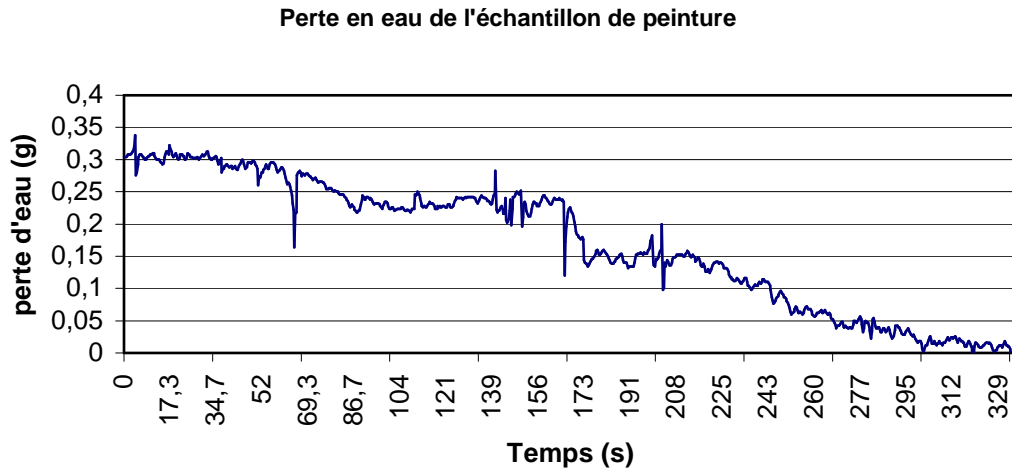
## 2- Première expérience :

Il s'agit ici d'une référence en rampe, avec  $T_0=36^\circ\text{C}$  et une pente de  $10^\circ\text{C}/\text{min}$ .

Comparaison entre le procédé et la référence

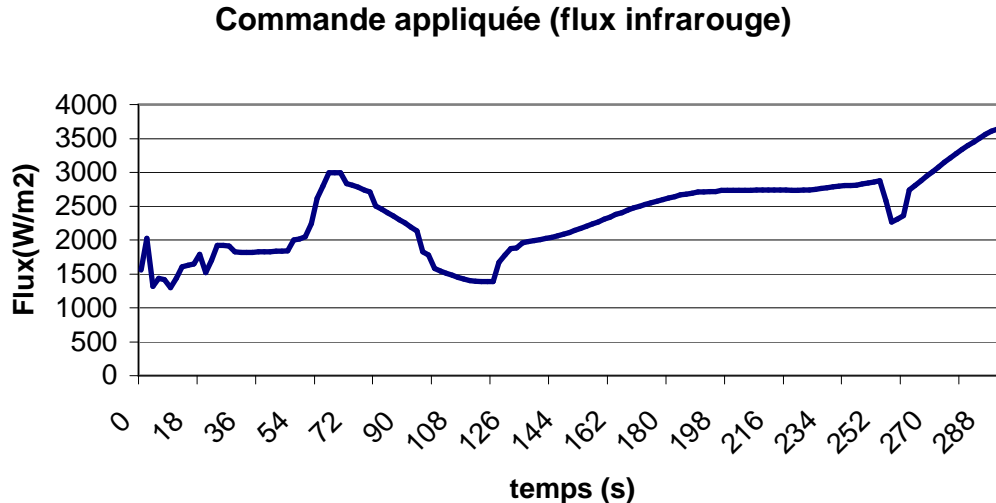


Dans cette expérience à faible vitesse de montée en température, on remarque que le procédé suit à quelques degrés près la référence de température imposée. Les quelques dépassements sont dus à la lenteur du refroidissement.



La figure ci-dessus représente la perte en eau en gramme de l'échantillon de peinture, elle est très bruitée à cause de la grande sensibilité de la balance utilisée. A partir de ce graphe on peut tomber sur l'humidité moyenne.

Comme on a utilisé une commande prédictive sous contrainte, les contraintes d'amplitude et de vitesse doivent à chaque fois être vérifiées.

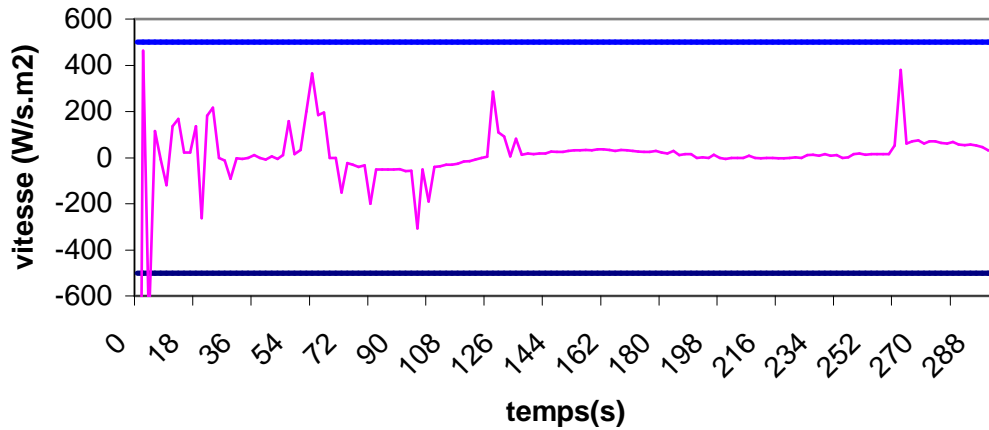


La figure ci-dessus nous montre pendant la commande du procédé, le flux infrarouge est resté à l'intérieur de l'intervalle autorisé, c'est à dire entre 0 et  $12\text{kW/m}^2$ . Les contraintes de vitesse ont été respecté sauf au début. comme le montre la figure ci-dessous.

La violation des contraintes au début de l'expérience comme le montre la figure ci-dessous est due au grand écart qui existe parfois entre la valeur initiale du flux et la valeur à

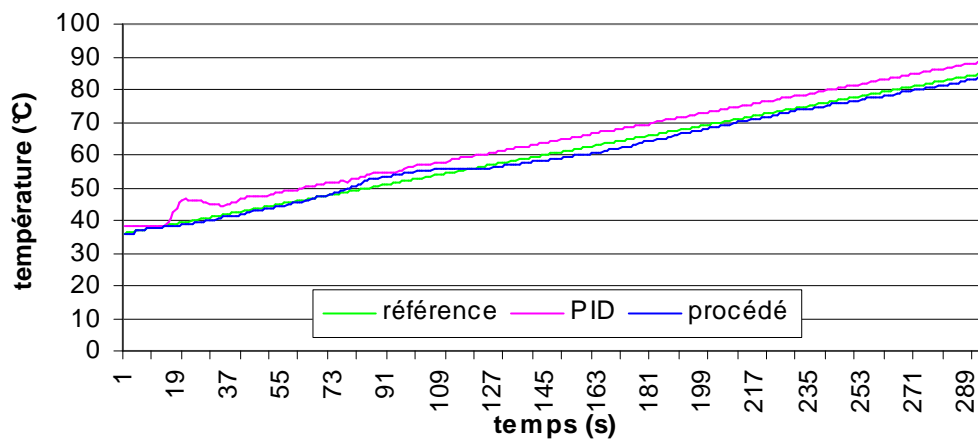
appliquer lors de la prochaine période d'échantillonnage et ce dépend de la référence à suivre. Cette période est transitoire représente une phase transitoire qui est rapidement dépassée.

### Dynamique de la commande infrarouge



La figure ci-dessous permet de faire une comparaison entre les résultats de la commande prédictive sous contraintes et les résultats du PID incorporé dans l'armoire de commande automatique, ces derniers ont été établis au cours d'une thèse effectuée dans le même laboratoire. Le tracé montre que les résultats de la commande prédictive sont nettement meilleurs, vu qu'elle prend en compte l'état futur du procédé et calcul en fonction de cet état la commande appropriée.

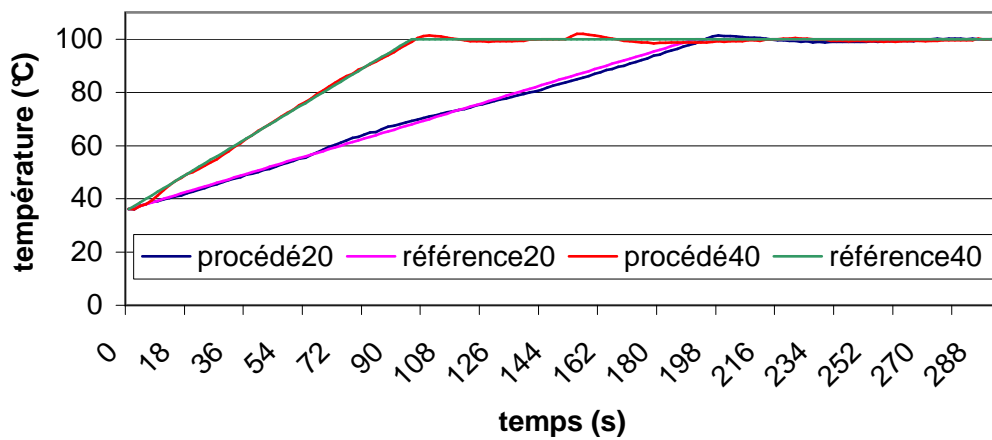
### Comparaison entre la commande prédictive et le PID



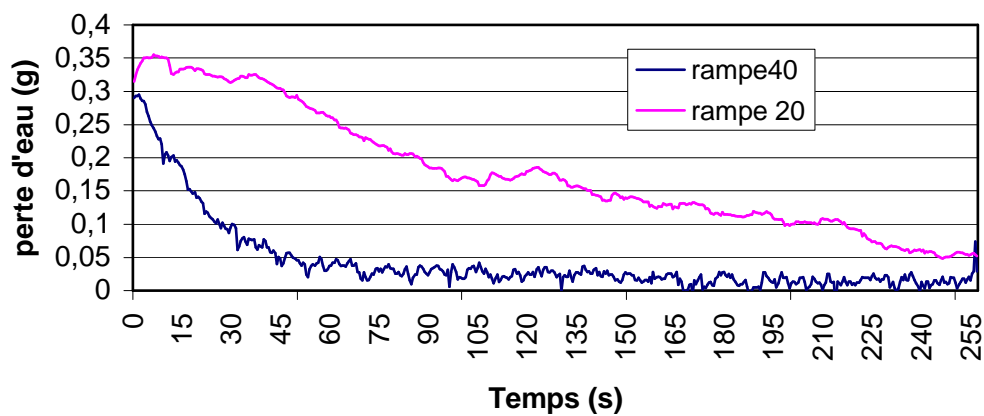
### 3- Seconde expérience :

Nous présentons ici les résultats obtenus avec des références en rampe, avec  $T_0=36^\circ\text{C}$  et une pente de  $20^\circ\text{C}/\text{min}$  pour la première référence et  $40^\circ\text{C}/\text{min}$  pour la seconde. Ces deux références sont appelées rampe20 et rampe40.

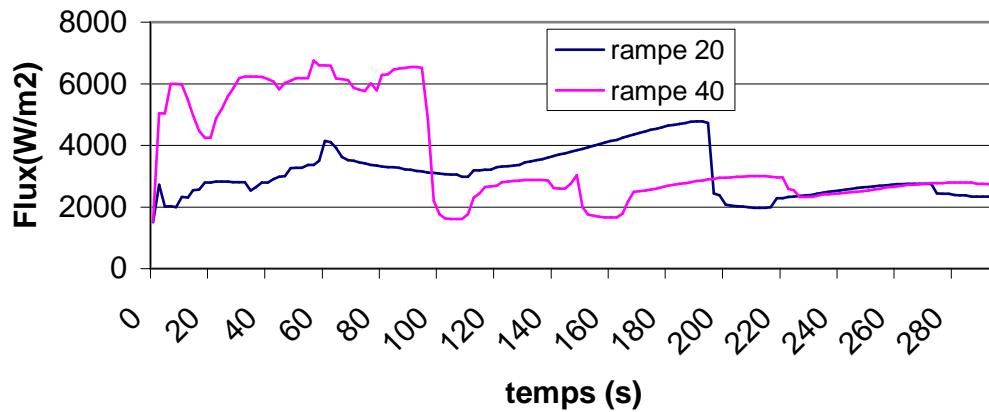
Comparaison entre le procédé et la référence



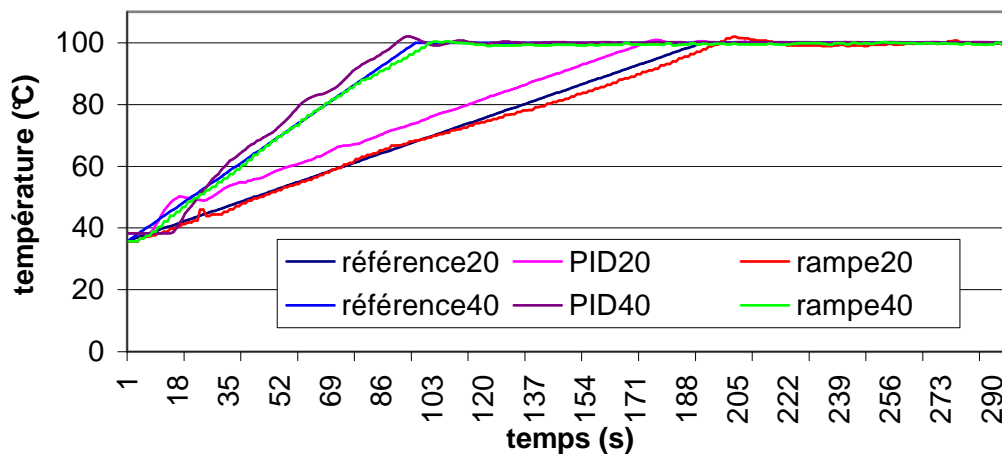
Perte en eau de l'échantillon de peinture



### Commande appliquée (flux infrarouge)



### Comparaison entre la commande prédictive et le PID



Pour ces deux manipulations, nous avons remarqué que le suivi à été réalisé d'une bonne manière et que les résultats de la commande adaptative sont nettement meilleurs que ceux du PID.

nous avons déduit, que cette commande peut être appliquée à des trajectoires de pentes différentes.

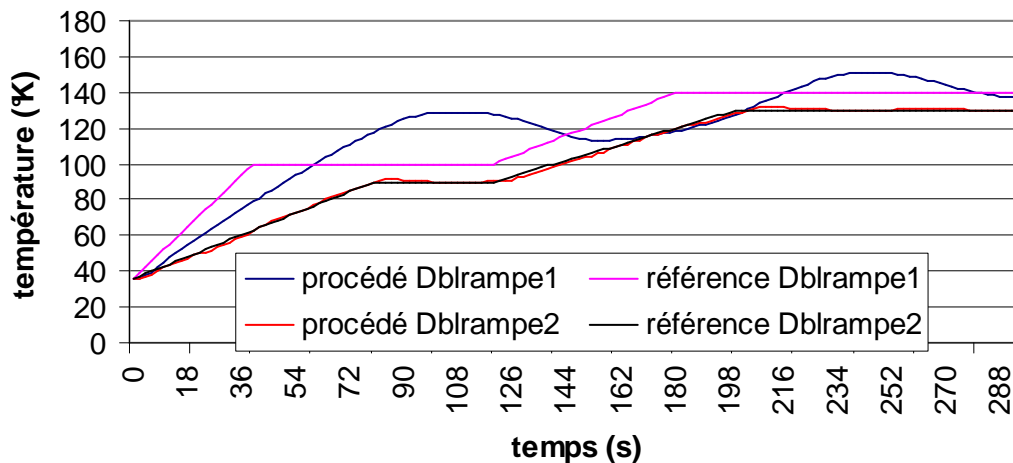


#### 4- Troisième expérience :

Dans cette dernière expérience, nous voulons expérimenter l'effet d'une double rampe sur la poursuite de trajectoire de température. Ce type de trajectoires est souvent utilisé pour le séchage de peinture au niveau industriel.

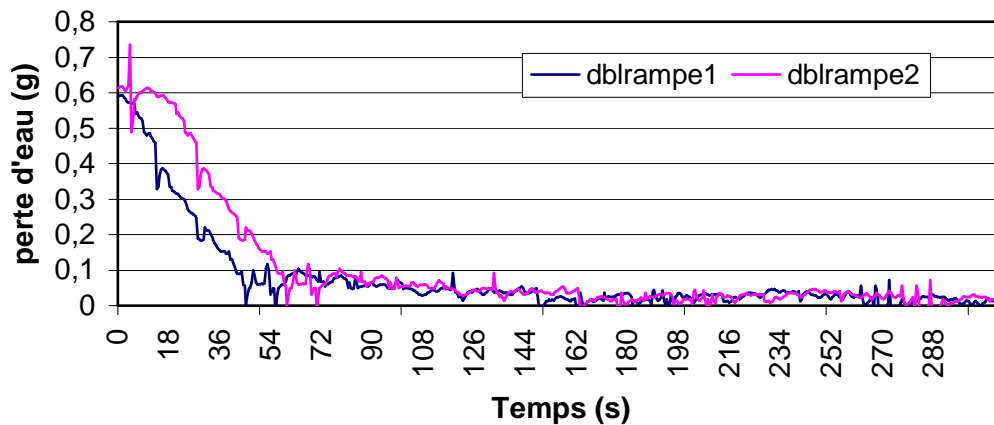
Pour des fins expérimentales, nous avons essayé deux types de rampe, l'une avec des pentes très raides (Dblrampe1) et l'autre avec une pente ordinaire(Dblrampe2).

**Comparaison entre le procédé et la référence**



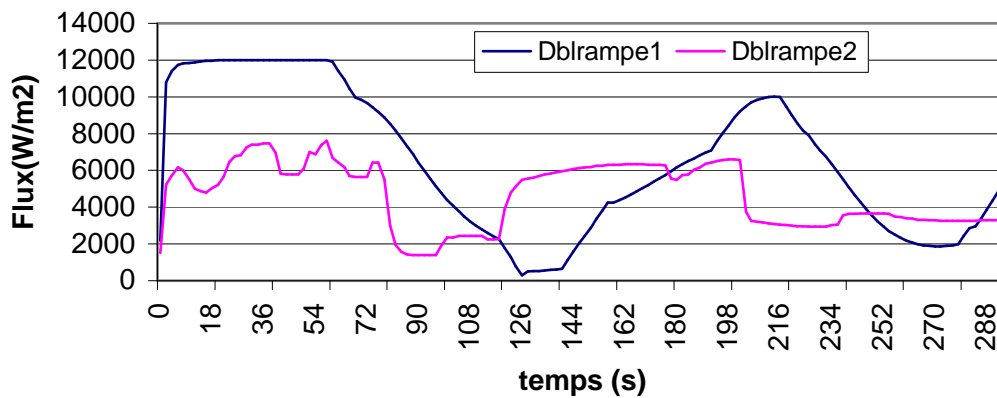
Nous remarquons sur la figure ci-dessus que la référence Dblrampe2 a donné lieu à bonne poursuite, parcontre la poursuite de Dblrampe1 a été raté et ce à cause de la raideur des pentes et de la limitation du sechoir en terme de vitesse de séchage.

**Perte en eau de l'échantillon de peinture**



Sur la figure ci-dessus, on constate que le flux infrarouge était à son maximum entre 10s et 60s, ceci explique que le panneau infrarouge délivrait le maximum de puissance, mais celle-ci restait insuffisante pour poursuivre la pente imposée.

**Commande appliquée (flux infrarouge)**



Ces expériences nous ont permis de valider la procédure de commande adoptée, La méthode s'est avéré robuste et efficace, en mettant à part quelques violations de contraintes qui peuvent être résolues en incluant dans la programmation une procédure qui les gère.

Les temps de calculs sont nettement inférieurs à la période d'échantillonnage, il sont dans la plupart des cas inférieurs à 1 ms, le maximum atteint représente 0.11 secondes qui est loin d'être supérieur à 2s (période d'échantillonnage).

Notre commande est adaptée à plusieurs type de trajectoires, mais elle présente des limites pour celle dont la pente est très raide. En réalité, ces limites sont dues aux contraintes imposés par le séchoir infrarouge.

---

# CHAPITRE V

## CONCLUSION

---

*“ Je ne pense jamais au futur; il vient assez tôt.”*

A. EINSTEIN (*interview, 1930*)

Dans ce travail, On a été appelé à piloter en temps réel un séchoir infrarouge en lui imposant une référence de température à suivre.

Nous avons été confronté à un système à paramètres répartis non linéaire, pour lequel nous avons adopté une structure de commande par modèle interne indirecte combinée avec un SPR non linéaire et un SPR linéarisé temps variant.

Afin de trouver la commande à appliquer à tout moment, nous avons adopté une méthode de programmation non linéaire mixte. Elle combine une loi de transformation, la méthode des pénalités externes et l'algorithme de Levenberg-Marquardt. Cette méthode nous a permis de passer d'un système contraint à un système non contraint.

La mise en œuvre d'un tel algorithme a donné de très bon résultats, comparés à ceux du PID [1], il a prouvé sa robustesse vis à vis de plusieurs types de références.

Les références dont le changement de température est très rapide, sont difficilement suivie voire non suivie, à cause des limitations en vitesse du procédé.

Le temps de calcul était nettement inférieur à la période d'échantillonnage, et les contraintes de vitesse et d'amplitude ont été rarement violées.

On s'est intéressé dans ce travail à la poursuite de référence de température. L'humidité représente un paramètre important pour ce genre de procédé, il serait intéressant de changer l'approche en poursuivant un profil d'humidité.

L'humidité provenant de la perte en eau du procédé est très bruité à cause de la grande sensibilité de la balance. Afin d'y remédier il faut prévoir une méthode de filtrage en temps réel.

---

# Annexe I

## MATÉRIEL UTILISÉ

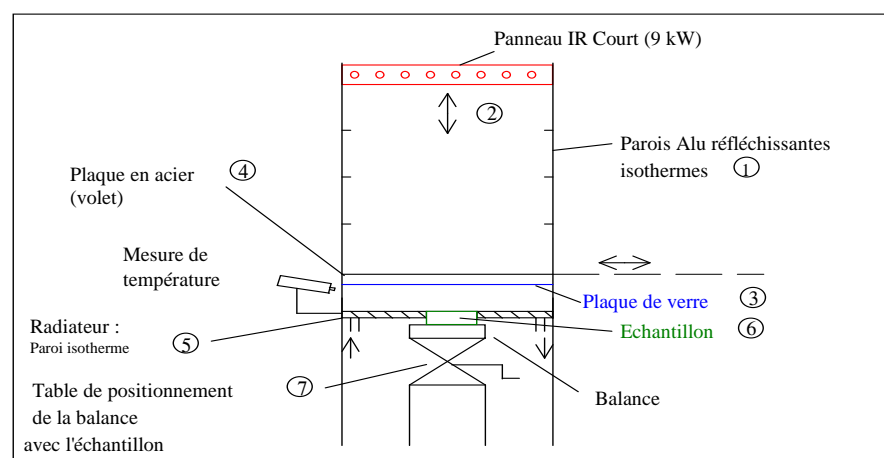
---

### 1- Description du séchoir infrarouge utilisé pour l'étude du séchage d'une peinture

#### 1.1- Description du séchoir

Ce séchoir a été conçu pour déterminer les cinétiques de séchage avec mesure de la masse et de la température de l'échantillon en continu soit sous rayonnement infrarouge, soit en convection, soit encore en séchage mixte (infrarouge + convection couplés) dans des conditions aérothermiques parfaitement contrôlés.

##### a. Partie infrarouge



*Figure 1: Schéma de la partie infrarouge du séchoir.*

La figure 1 représente le corps du séchoir, c'est-à-dire la partie relative à l'infrarouge. Cette partie (veine de mesure + partie haute dans laquelle est positionné l'émetteur infrarouge) a pour dimension globale  $1 \times 0,5 \times 0,5 \text{ m}^3$ . Elle est constituée :

- ① de 4 parois réfléchissantes en aluminium. Ces parois sont maintenues isothermes ( $18 < T_{\text{parois}} < 22 \text{ °C}$ ) par une circulation d'eau à débit constant de 440 l/h. Ainsi, l'émission parasite d'énergie infrarouge par les parois est limitée.

- ② entre ces 4 parois, le panneau infrarouge peut être déplacé selon 5 positions prédéterminées. Ce déplacement est assuré grâce à un vérin pneumatique.

- ③ en partie haute, la veine de mesure proprement dite est matérialisée par une plaque de verre en vitrocéramique transparente aux infrarouges courts ( $\tau=90 \%$  pour  $0,5 < \lambda < 2 \text{ }\mu\text{m}$ ). Elle permet ainsi de confiner le volume offert au passage de l'air lors d'expériences de séchage mixte : convectif et/ou infrarouge.

- ④ une plaque d'acier (volet) peut protéger l'échantillon du rayonnement infrarouge pendant sa mise en place. Ce volet facilite également la détermination précise du temps zéro pour les expériences de séchage.

- ⑤ la paroi inférieure de la veine de mesure au niveau de l'échantillon est rendue isotherme par une circulation d'eau alors que sa couleur noire mat permet l'élimination d'une grande partie du flux infrarouge réfléchi.

- ⑥ l'échantillon a une dimension maximale de  $150 \times 150 \text{ mm}^2$ .

- ⑦ un support élévateur permet un positionnement correct de l'échantillon et de la balance.

**b.Mesures**

Au cours des expériences de séchage, nous enregistrons les données suivantes :

- **La masse** : nous utilisons une balance SARTORIUS de portée maximale 620 grammes et de précision  $10^{-3}$  gramme.
  
- **La température de l'échantillon** : nous mesurons la température de l'échantillon avec un pyromètre infrarouge HEIMANN de type KT15.82. Ce pyromètre est sensible au rayonnement infrarouge émis par le produit entre 8 et 14  $\mu\text{m}$ . Son domaine de mesure est compris entre 20 et 300 °C.

**1-2. L'émetteur infrarouge**

L'émetteur infrarouge est un panneau électrique infrarouge court qui a été fourni par EDF - Centre des Renardières. Il a une puissance globale de 12 kW, et est constitué de neuf lampes à quartz avec filament de tungstène. La température du filament peut être supérieure à 2200 K, ce qui correspond à une émission centrée sur une longueur d'onde de 1,2  $\mu\text{m}$ . Chaque lampe peut être allumée indépendamment les unes des autres, et le temps de réponse est tel que 95 % de la puissance maximale est atteinte au bout de 25 secondes.

Ce panneau est équipé d'un réflecteur plan en aluminium. Le boîtier est équipé de deux ventilateurs qui soufflent de l'air frais au dos des réflecteurs et refroidissent les connexions électriques.

Une armoire électrique permet l'alimentation du panneau qui fonctionne selon deux modes :

- **mode manuel** : les tubes sont alimentés par une tension constante de 240 V environ ;
  
- **mode automatique** : les tubes sont alimentés à partir d'un bloc thyristor dont la tension de sortie est reliée à la température des échantillons à l'aide d'un régulateur de marque EUROTHERM série 900. Celui-ci possède à la fois les algorithmes et les

fonctions particulières permettant d'obtenir au niveau de l'échantillon une montée en température avec une pente quasiment constante sans dépassement de la valeur de consigne maximum. Cette régulation se fait à partir de la mesure du pyromètre. Ce mode de fonctionnement est important car la vitesse de montée en température est un paramètre de réglage important des installations industrielles de séchage des peintures.

### **1-3. Acquisition et traitement des données**

- La balance SARTORIUS est équipée d'une liaison série RS 232.
- Pour la température (pyromètre) et le flux, nous utilisons du matériel d'acquisition qu'on va décrire par la suite. Le pyromètre renvoie un courant qui traduit la mesure, On envoi ce courant sur une résistance qui permet de récupérer la tension équivalente afin de l'envoyer sur une entrée analogique de la carte d'acquisition qui se chargera de la numériser.

## **2- Carte interface multifonctions PC-MES2 [6]:**

Cette carte fabriquée par EUROSMART, nous a servi pour l'acquisition de la température envoyée par le pyromètre, et l'envoi de la commande sur les lampes infrarouge. Elle présente les caractéristique suivantes :

### **a- Conversion analogique / digitale :**

- 8 voies analogiques simples.
- Impédence d'entrée : 1Mohm
- 2 calibres programmables : 0/+10v et -1/+5v
- temps de conversion 25 micro secondes

### **b- Conversion digitale / analogique**

- 2 voies independantes
- Calibre programmable : 0/+10v
- courant max. : 10 mA C. C.
- temps de conversion : 1.5 micro secondes



La carte s'installe à l'intérieur du PC sur un des slots libre et elle nécessite pas un driver afin de fonctionner. Son adressage nécessite deux groupes de 8 adresses qui peuvent être choisis entre 000h et 3FFh.

Afin d'utiliser la carte, nous avons écrit plusieurs procédures en langage C, car il reste le mieux adapté pour la gestion des entrées/sorties. Comme la commande et la température sont positives, nous avons utilisé le mode unipolaire (0/+10v).

La conversion analogique / digitale, fournit une valeur comprise entre 0 (0V) et 4095 (10v). De même la commande doit être envoyée en respectant ce même format, c'est à dire 0 pour 0 kWm<sup>-2</sup> et 4095 pour 12 kWm<sup>-2</sup>.

---

# Annexe II

## EXPRESSIONS DU PROCÉDÉ DE SÉCHAGE

---

*“ De petites différences sont intéressantes. Ce sont elles qui obligent à l'exactitude.”*

SUNDMAN (L'Anachorète)

Dans cet annexe, on reporte toutes les expressions utilisées dans le procédé de séchage.

La vitesse de séchage  $\dot{m}(\bar{\chi}, t)$  s'exprime :

$$\dot{m}(\bar{\chi}, t) = C_7 \frac{1}{T_{moy}} [a_w(\bar{\chi})P_{Vsat}(T) - P_{Vair}]$$

$$\text{Où } T_{moy} = \frac{T + T_{air}}{2}$$

L'activité de l'eau  $a_w(\bar{\chi})$  est la solution de l'équation :

$$\frac{a_w(\bar{\chi})}{\bar{\chi}} = A_1 a_w^2(\bar{\chi}) + A_2 a_w(\bar{\chi}) + A_3$$

La pression de la vapeur saturée est notée  $P_{Vsat}(T)$  et est donnée en millibar par l'expression :

$$\log_{10} P_{Vsat}(T) = C_0 \left( \frac{T}{T + T_1} \right) - C_1 \log_{10} \left( \frac{T}{T + T_1} \right) + C_2 (1 - 10^{-\frac{C_3 T}{T_1}}) + C_4 (10^{\frac{C_5 T}{T_1 + T}} - 1) + C_6$$

Avec  $T_1=273.16$

Les autres expressions sont les suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} l_v(T) = [a_5 T^5 + a_4 T^4 + a_3 T^3 + a_2 T^2 + a_1 T + a_0] \\ \alpha_{ir} = \alpha_p(\bar{\chi})(1 - \rho_p) + \alpha_s(1 - \rho_p)(1 - \alpha_p(\bar{\chi})) + \alpha_p(\bar{\chi})(1 - \alpha_s)(1 - \rho_p)(1 - \alpha_p(\bar{\chi})) \\ \alpha_p(\bar{\chi}) = 1 - \left[ aa_4 \left( \frac{\bar{\chi}}{\bar{\chi}_0} \right)^3 + aa_3 \left( \frac{\bar{\chi}}{\bar{\chi}_0} \right)^2 + aa_2 \left( \frac{\bar{\chi}}{\bar{\chi}_0} \right) + aa_1 \right] \frac{1}{1 - \rho_p} \\ C_p(\bar{\chi}, T) = [oT + b + \bar{\chi} \{c_{p3} T^3 + c_{p2} T^2 + c_{p1} T + c_{p0}\}] * 10^3 \end{array} \right.$$