

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université A.MIRA Bejaïa  
Faculté de Technologie  
Département de Génie Electrique



# Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Automatique

*Spécialité : Automatique et systèmes*

*Thème*

**Commande prédictive fonctionnelle pour la régulation  
thermique d'un chauffage bâtiment**

**Réalisé par :**

M<sup>lle</sup> OUALI Nassima

**Promoteur :**

D<sup>r</sup> H. LEHOUCHE

**Co-promoteur :**

M<sup>r</sup> A. OUARET

**Devant le jury composé de:**

M<sup>me</sup> N. BELLAHSENE

M<sup>r</sup> S. HANFOUG

*Année universitaire 2017/2018*

## *Remerciements*

Je tiens à remercier vivement Dr. LEHOUCHE Hocine et Mr. OUARET Ahmed pour m'avoir honoré par leurs encadrement, pour leurs gentillesse et patience, leurs orientations et précieux conseils ;

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à tous les enseignants du Département ATE qui m'ont tellement aidé durant mon cursus universitaire;

Je remercie aussi les membres de jury d'avoir accepté d'évaluer mon travail ;

Enfin, dans le souci de n'oublier personne, je tiens à remercier toute personne ayant participé ou aidé de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

# *Dédicaces*

Avec l'aide de Dieu tout puissant, j'ai pu achever ce travail que je dédie

À la mémoire de mes défunts grands-parents ;

À mes chers parents qui ont tant attendu le fruit de leur éducation, ma mère qui a été patiente avec moi, mon père pour sa disponibilité et ses conseils ;

À mes adorables sœurs et frères qui ont été serviables et attentionnés ;

À mes chers neveux et chères nièces ;

À tous mes amis, mes oncles, mes cousins et cousines et toute ma grande famille ;

À tous ceux qui me connaissent.

# **La commande prédictive fonctionnelle pour la régulation thermique d'un chauffage bâtiment**

## **Résumé:**

L'objectif principal de la commande d'un système thermique (le chauffage) dans le bâtiment peut s'exprimer sous forme d'un problème d'optimisation : il s'agit de minimiser la consommation énergétique tout en garantissant le niveau de confort thermique désiré. La commande prédictive fonctionnelle est adaptée pour satisfaire ces exigences, et déjà l'objet d'études et d'évaluation pour ce type d'application. En effet, la méthode est adaptée à la prise en compte de contraintes multiples comme celle des conditions météorologique. La commande a été appliquée à un dispositif de chauffage électrique, en utilisant la boîte à outils SIMBAD, diverses simulations interprétées par la suite ont montrées la validité et la robustesse de la commande.

**Mots clés :** Confort thermique, consommation d'énergie, optimisation, commande prédictive fonctionnelle.

## **Predictive functional control for thermic regulation of a building heating**

### **Abstract :**

The main objective of controlling a thermal system (heating) in the building can be expressed as a problem of optimization: it is to minimize the energy consumption while ensuring the level of thermal comfort desired. The functional predictive control is adapted to meet these requirements, and already the object of studies and evaluation for this kind of application. Indeed, the method is adapted to taking into account multiple constraints like that of the meteorological conditions. The control was applied to an electric heater, using the SIMBAD toolbox, various simulations interpreted later showed the validity and robustness of this control.

**Key words :** Thermal comfort, energy consumption, optimization, predictive functional control

# Table des matières

<b>Liste d'abréviations</b> .....	I
<b>Liste des symboles</b> .....	II
<b>Liste des figures</b> .....	III
<b>Liste des tableaux</b> .....	V
<b>Introduction Générale</b> .....	1
<b>CHAPITRE I : Etude et simulation du système chauffage bâtiment</b> .....	3
I.1 Introduction.....	3
I.2 La consommation d'énergie par secteur.....	3
I.3 La consommation d'énergie dans les bâtiments (résidence principales).....	4
I.4 Le chauffage dans la consommation énergétique des bâtiments.....	4
I.5 Généralités sur les chauffages.....	6
I.5.1 Système de chauffage.....	6
I.5.2 Le chauffage électrique.....	6
I.6 Le confort thermique.....	6
I.6.1 Définition du confort thermique.....	7
I.6.2 Les paramètres influant sur le confort thermique.....	7
I.6.3 Comment obtenir un bon confort thermique.....	8
I.7 Pourquoi la simulation des bâtiments.....	8
I.8 Bibliothèque de l'outil de simulation SIMBAD.....	9
I.9 Modèle radiateur électrique.....	10
I.10 Le modèle de la pièce utilisée.....	11
I.11 Conditions météorologiques.....	12
I.11.1 Les caractéristiques de la pièce.....	12
I.12 Simulation du système sans régulation.....	13
I.13 Le but de la commande.....	17
I.14 Conclusion.....	18

## **CHAPITRE II: Commande prédictive pour la régulation thermique du bâtiment.....19**

II.1	Introduction.....	19
II.2	La commande prédictive.....	19
II.3	Principe de la commande prédictive.....	20
II.4	Les différentes techniques de la commande prédictive.....	20
II.5	Avantages et inconvénients de la commande prédictive.....	21
II.6	La commande prédictive fonctionnelle (PFC).....	21
II.7	Principe de la commande prédictive fonctionnelle.....	22
II.7.1	Modèle interne.....	23
II.7.2	Trajectoire de référence.....	23
II.7.3	Horizon de coïncidence.....	23
II.7.4	Objectif de la commande.....	24
II.8	Le calcul de la commande.....	24
II.9	Paramètres nécessaires à la mise en œuvre de la PFC.....	27
II.10	La commande PFC d'un système d'ordre élevé.....	28
II.11	Simulation d'un processus du 1 <sup>er</sup> ordre (Cas : circuit RC).....	30
II.12	Simulation d'un système de 3 <sup>ème</sup> ordre.....	31
II.13	Conclusion.....	34

## **CHAPITRE III: Application de la PFC pour la régulation thermique de la température ambiante dans un bâtiment.....35**

III.1	Introduction.....	35
III.2	Les paramètres du système utilisés.....	35
III.3	Identification du système chauffage bâtiment.....	36
III.4	Application de la commande PFC.....	37
III.4.1	Algorithme de calcul de la commande.....	37
III.5	Représentation graphique des différents indices.....	40
III.6	Étude de la robustesse de la commande PFC.....	42
III.7	Conclusion.....	50

<b>Conclusion Générale</b> .....	51
<b>Bibliographie</b> .....	52

# Liste d'abréviations

<b>ARMA</b>	Auto Regressive Moving Average
<b>BOZ</b>	Bloqueur d'Ordre Zéro
<b>CSI</b>	Commande Stability Index
<b>CSTB</b>	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
<b>CVC</b>	Chauffage, Ventilation, Climatisation
<b>DMC</b>	Dynamic Matrix Control
<b>GPC</b>	Generalized predictive Control
<b>HVAC</b>	Heating, Ventilation and Air-Conditionning
<b>MPC</b>	Model Predictive Control
<b>PFC</b>	predictive functional control
<b>PID</b>	Régulateur Proportionnel, Intégrateur, Dérivateur
<b>SIMBAD</b>	SIMulator of Building And Devices
<b>TOR</b>	Régulateur Tout Ou Rien
<b>TSI</b>	Temperature Stability Index
<b>VMC</b>	Ventilation Mécanique Contrôlée

## Liste des symboles

$y_p$	La sortie du procédé
$y_M$	La sortie du modèle
$K_M$	Le gain statique
$r$	Retard pur
$\tau$	La constante du temps
$p$	Variable de Laplace
$H$	Point de coïncidence
$\Delta_p$	Incrément de la sortie du procédé
$\Delta_M$	Incrément de la sortie du modèle
$T_e$	La période d'échantillonnage
$T_{Bf}$	Temps de réponse en boucle fermé
$C$	La consigne
$u$	La commande
$\tau_{Bf}$	Constante du temps de la trajectoire de référence
$T_{BO}$	Temps de réponse en boucle ouverte
$F_{accel}$	Facteur d'accélération
$y_L$	La réponse libre
$y_F$	La réponse forcée

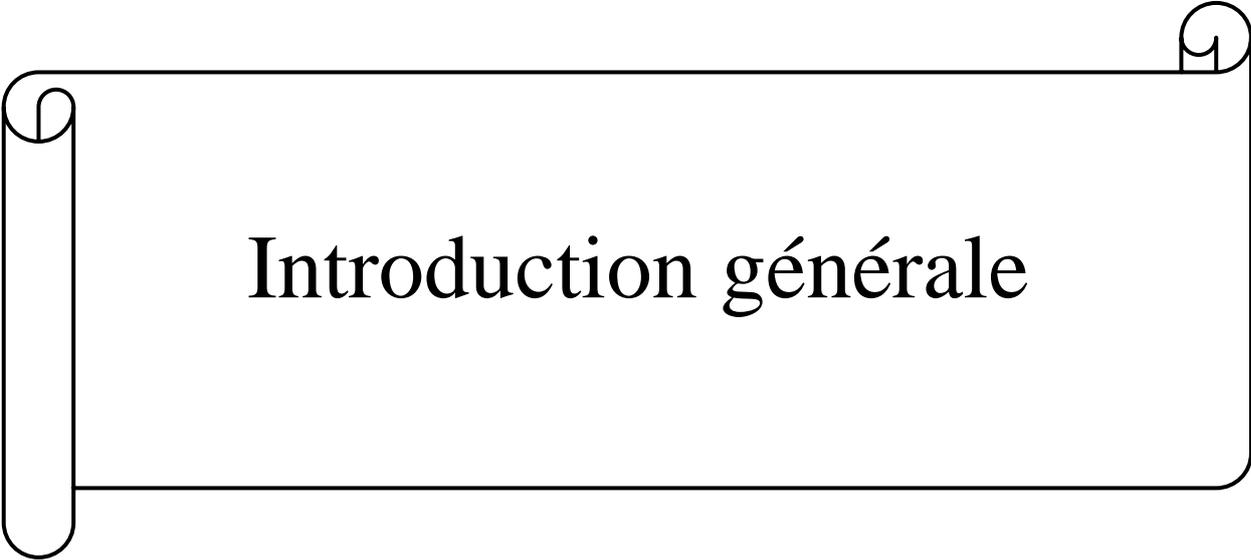
# Liste des figures

<b>Figure I.1:</b> Le modèle de la pièce utilisée avec le réchauffeur électrique .....	10
<b>Figure I.2:</b> Allure de la sortie du système en boucle ouverte (1 jour).....	14
<b>Figure I.3:</b> Allure de la sortie du système (quatre jours).....	14
<b>Figure I.4:</b> Allure de la sortie du système en boucle ouverte (1 jour).....	16
<b>Figure I.5:</b> Allure de la sortie du système (4 jours).....	16
<b>Figure II.1:</b> Stratégie de la commande prédictive.....	20
<b>Figure II.2 :</b> Principe de la commande prédictive fonctionnelle PFC .....	22
<b>Figure II.3:</b> Modèle interne : situation parallèle avec procédé. ....	23
<b>Figure II.4:</b> Points de coïncidence.....	24
<b>Figure II.5:</b> Schéma bloc de la commande PFC sans retard pur. ....	27
<b>Figure II.6:</b> Schéma bloc de la commande PFC avec retard pur.....	27
<b>Figure II.7 :</b> L'allure de la sortie du système. ....	31
<b>Figure II.8 :</b> L'allure de la commande. ....	31
<b>Figure II.9 :</b> l'allure de la sortie du système. ....	32
<b>Figure II.10:</b> l'allure de signal de commande. ....	33
<b>Figure II.11:</b> La sortie du système avec perturbation. ....	33
<b>Figure II.12 :</b> La commande du système avec perturbation.....	33
<b>Figure III.1:</b> Chauffage d'une pièce avec des entrées reliées à la météo.....	36
<b>Figure III.2:</b> Schéma bloc de la commande PFC.....	37
<b>Figure III.3:</b> Modèle interne parallèle.....	38
<b>Figure III.4:</b> Allure de la sortie du système et la consigne .....	40
<b>Figure III.5:</b> Représentation graphique de l'indice de stabilité de la commande .....	41
<b>Figure III.6:</b> Représentation graphique de l'indice de confort .....	41
<b>Figure III.7:</b> Représentation graphique de l'indice de consommation .....	41
<b>Figure III.8:</b> Allure de la sortie du système et la consigne pour deux jours .....	42
<b>Figure III.9:</b> Allures de la température ambiante de la pièce et la consigne pour les trois cas.....	43
<b>Figure III.10:</b> Allures des indices de confort pour les trois cas. ....	43
<b>Figure III.11:</b> Allures des indices de consommation pour les trois cas. ....	44
<b>Figure III.12:</b> Allures de la température ambiante de la pièce et la consigne pour les trois cas.....	45
<b>Figure III.13:</b> Allures des indices de confort pour les trois cas. ....	45
<b>Figure III.14:</b> Allures des indices de confort pour les trois cas. ....	46
<b>Figure III.15:</b> Allures de la température ambiante de la pièce et la consigne pour les trois cas.....	47
<b>Figure III.16:</b> Allures des indices de confort pour les trois cas. ....	47
<b>Figure III.17:</b> Allures des indices de consommation pour les trois cas. ....	47

<b>Figure III.18:</b> Allures de la température ambiante de la pièce et la consigne pour les trois cas.....	48
<b>Figure III.19:</b> Allures des indices de confort pour les trois cas. ....	49
<b>Figure III.20:</b> Allures des indices de consommation pour les trois cas. ....	49

## Liste des tableaux

<b>Tableau I-1:</b> La consommation d'énergie par secteur en France en 2015. ....	3
<b>Tableau I-2:</b> Le chauffage dans la consommation énergétique des bâtiments .....	5
<b>Tableau I-3:</b> Représentation des caractéristiques du bureau. ....	12
<b>Tableau I-4:</b> La représentation des entrées du système utilisées. ....	13
<b>Tableau I-5:</b> Les entrées variables. ....	15
<b>Tableau III-1:</b> Paramètres du système .....	35
<b>Tableau III-2:</b> Représentation des paramètres prises pour la simulation.....	37



# Introduction générale

## Introduction générale

L'utilisation mondiale croissante de l'énergie a déjà suscité des inquiétudes quant aux difficultés d'approvisionnement, à l'épuisement des ressources énergétiques et aux impacts environnementaux lourds. La contribution globale des bâtiments à la consommation d'énergie, tant résidentielle que tertiaire, n'a cessé d'augmenter et a dépassé les autres grands secteurs: l'industrie et le transport.

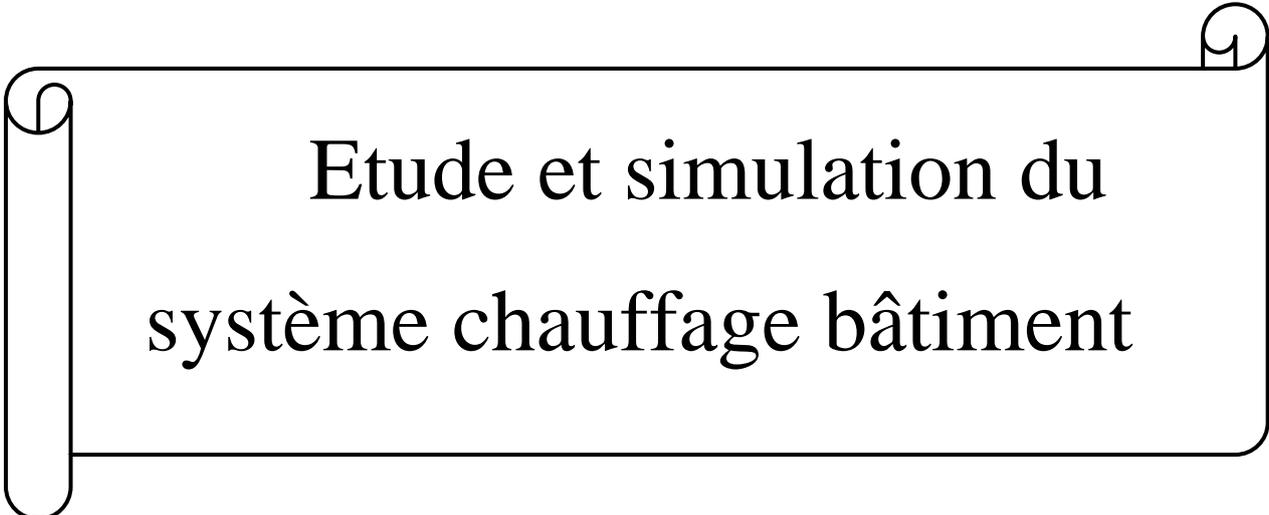
La croissance de la population, la demande croissante de services de construction et les niveaux de confort, ainsi que l'augmentation du temps passé dans les bâtiments, qui ont fait que la tendance de la demande d'énergie se poursuivra sa hausse à l'avenir. Parmi les services du bâtiment, la croissance de la consommation énergétique des systèmes HVAC est particulièrement significative, dont le chauffage est le plus gros responsable [1].

Pour cette raison, on se pose la question : quelle est la stratégie optimale qui satisfera le compromis entre le confort et la consommation énergétique? La commande prédictive semble une technique prometteuse pour résoudre ce problème d'optimisation rencontré dans le domaine du bâtiment. En quelques mots, cette technique consiste en une résolution répétée à chaque période d'échantillonnage d'un problème de commande optimale. Elle repose sur l'utilisation d'un modèle dynamique du système à réguler (ici le bâtiment) permettant d'anticiper son comportement futur. Cet objectif semble l'argument suffisant pour l'utilisation une des techniques de la commande prédictive dans ce cas. Et pour l'atteindre, nous avons mis en œuvre une régulation de type PFC.

Ce présent mémoire détaillera de manière succincte la commande prédictive fonctionnelle pour la régulation thermique d'un chauffage bâtiment. Le premier chapitre est consacré à la représentation de la consommation d'énergie dans différents secteurs en se focalisant sur les bâtiments résidentiels et tertiaires, ensuite, on fera une description du système chauffage bâtiment, ainsi les facteurs influant sur ce dernier. Le deuxième chapitre porte sur le développement de l'algorithme PFC afin de pouvoir calculer la loi de commande qui sera appliquée par la suite au chauffage bâtiment. Des cas d'études seront abordés afin de valider les performances de cette approche. Et pour finir, le troisième chapitre est une application de la commande élaborée dans le chapitre précédant pour répondre à l'objectif de l'optimisation en assurant un bon suivi de la température désirée, ainsi de vérifier la robustesse de cette

commande en effectuant des simulations, les différents résultats seront interprétés par la suite. Une conclusion générale ainsi que des perspectives de ce travail clôture ce mémoire.

# CHAPITRE I



Etude et simulation du  
système chauffage bâtiment

# CHAPITRE I : Etude et simulation du système chauffage bâtiment

## I.1 Introduction

La fonction essentielle d'une habitation est d'assurer une ambiance intérieure bien adaptée à nos besoins et à notre confort. L'habitant place souvent son confort avant les économies d'énergie [2].

Dans ce qui suit nous allons présenter les données de consommation énergétique dans les différents secteurs d'activités, par la suite on fera une description du système chauffage qui y est le plus gros responsable, enfin on présentera la bibliothèque SIMBAD qui va nous permettre de simuler notre système chauffage bâtiment afin de voir l'influence des différents paramètres de la pièce traitée sur ce système.

## I.2 La consommation d'énergie par secteur

Tous les domaines d'activités ne consomment pas la même quantité d'énergie, ni les mêmes énergies. Les secteurs tertiaire et résidentiel à savoir les bâtiments, étaient les plus gros consommateurs en France en 2015 et représentaient 44.9 % de la facture énergétique du pays. Leur énergie préférée : l'électricité, à près de 37 %. En comparaison, le secteur des transports représentait 33 % de la consommation énergétique française et utilisait majoritairement le pétrole (75 %) pour son activité.

L'industrie n'est pas en reste, avec 19 % de la consommation totale du pays en 2015, mais celle-ci préfère le gaz, qui représente un quart de sa facture. Enfin, l'agriculture est le secteur le plus économe : seulement 3 % de la dépense totale d'énergie. (Voir le tableau ci-dessous) [3].

**Tableau I-1:** La consommation d'énergie par secteur en France en 2015

Résidentiel et tertiaire	44,9%
Transports	33.1%
Industrie	19%
Agriculture	3%

### **I.3 La consommation d'énergie dans les bâtiments (résidence principales)**

Le secteur du bâtiment en général, qu'il soit résidentiel ou tertiaire, est fortement consommateur d'énergie. En conséquence, 44.9% d'énergie finale consommée dans le monde est due aux besoins dans les bâtiments (bureaux, commerces, hôpitaux, écoles, hôtels, etc.). La recherche permanente du confort, la croissance de la population ainsi que l'augmentation du temps passé dans les bâtiments sont les principales raisons qui ont fait que ce secteur dépasse le niveau de consommation du secteur des transports.

Pour les bâtiments résidentiels, c'est la taille et la localisation qui ont l'impact le plus fort sur la consommation d'énergie. La quantité et le type d'énergie utilisée dans les habitations sont non seulement liés aux conditions météorologiques, à la conception architecturale, aux systèmes énergétiques mis en œuvre, mais aussi au comportement des occupants. En général, les logements dans les pays développés utilisent plus d'énergie que ceux dans les pays aux économies émergentes.

Le secteur tertiaire couvre tous les bâtiments publics et commerciaux (bureaux, magasins, écoles, restaurants, hôtels, hôpitaux, musées, etc.) avec une grande variété d'activités et d'usages ayant un impact énorme sur la qualité et la quantité d'énergie nécessaire. Les bâtiments de bureaux et de commerce sont les plus énergivores, représentant en général plus de 50 % de l'énergie totale consommée par le secteur non résidentiel [4]. La croissance de la population implique une demande de services plus importante et requiert évidemment plus d'énergie.

### **I.4 Le chauffage dans la consommation énergétique des bâtiments**

Le tableau ci-dessous montre la distribution de la consommation dans les bâtiments résidentiels et tertiaires européens. Le poste de chauffage est de loin le système le plus gourmand en énergie, étant responsable de plus de la moitié de la consommation. En France, la hiérarchie ne se modifie pas, mais les proportions sont encore un peu plus déséquilibrées, le chauffage dépassant même 65%.

En considérant la part revenant aux bâtiments dans la consommation énergétique européenne, il apparaît que la consommation française franchit le seuil des 67%, ce qui laisse entrevoir qu'il faudra affiner un peu plus l'analyse de ce secteur.

**Tableau I-2:** Le chauffage dans la consommation énergétique des bâtiments [3]

Chauffage	67%
Appareils électriques	16%
Eau chaude sanitaire	10%
Cuisson	6%

Les facteurs qui influencent sur la quantité d'énergie dépensée par le poste de chauffage d'un bâtiment sont décrits ci-dessous [4].

**1. Le climat :** est le facteur le plus important agissant sur la demande du chauffage dans un bâtiment. Évidemment, plus il fait froid, plus le besoin en énergie pour le chauffage augmente. Cette influence de la température extérieure sur la demande du chauffage est mesurée en météorologie en degrés jour (DJ), qui représentent l'écart entre la température moyenne extérieure pendant une journée et un seuil de température préétabli. Le nombre de degrés jours unifiés (DJu) est déterminé en utilisant comme température de référence la valeur de 19°C. Avec cette méthode très simple, on peut estimer la consommation d'énergie thermique. La demande énergétique peut être réduite selon l'intensité des apports solaires.

**2. La géométrie du bâtiment :** joue un rôle non négligeable, un rapport élevé volume /surface (une forme simple, de préférence un cube) induit une consommation plus faible du poste de chauffage, réduisant les pertes de chaleur à travers l'enveloppe.

**3. La ventilation :** peut jouer un rôle clé, surtout en ce qui concerne les bâtiments à faibles besoins énergétiques ou les maisons passives. Pour réduire les pertes de chaleur, les systèmes de ventilation mécanique intégrant une récupération de la chaleur sont de plus en plus utilisés.

**4. La méthode de contrôle du système de chauffage :** joue à la fois sur le confort et la consommation énergétique, ainsi des écarts significatifs apparaissent entre les performances d'un système de chauffage contrôlé manuellement, un système piloté par une loi de commande simple (de type TOR ou P/PI/PID) et un système piloté par une loi commande avancée (de type prédictif par exemple).

**5. Le mode de vie des occupants :** à un effet décisif sur la facture énergétique, la négligence et les mauvaises habitudes peuvent réduire sensiblement les avantages liés aux mesures de rendement énergétique présentes dans le bâtiment.

**6. Les apports de chaleur provenant des occupants :** ou des différents appareils électriques (autres que les équipements de chauffage) peuvent avoir un effet appréciable dans certaines situations (salles de théâtre, cinéma, écoles, salles, etc.)

## **I.5 Généralités sur les chauffages**

### **I.5.1 Système de chauffage**

L'objectif de l'installation du chauffage ou de la climatisation d'une pièce est d'apporter un confort thermique aux occupants, quelles que soient les conditions climatiques extérieures. Le chauffage est obtenu par :

- a) Des convecteurs, plinthes chauffantes ou panneaux radiants admis à la marque NF - Électricité, de catégorie A ou B qui est indiquée sur l'étiquette informative du produit.
- b) Des plafonds ou des câbles chauffants bénéficient d'un avis technique du C.S.T.B [5].

### **I.5.2 Le chauffage électrique**

Le chauffage d'une habitation par l'électricité est une solution simple, propre, aisée à mettre en œuvre et d'un coût d'installation modique (par rapport aux autres modes de chauffage) .

La forte consommation d'énergie que l'on reprochait autrefois au chauffage électrique désormais parfaitement maîtrisée au moyen d'appareils de qualité, par la gestion de chauffage grâce à une régulation adaptée aux besoins et par une bonne isolation de l'habitation. Le chauffage électrique ne nécessite pratiquement pas d'entretien et son fonctionnement est d'une grande simplicité.

C'est un mode de chauffage très performant. L'air ambiant est chauffé directement, contrairement au chauffage à eau chaude, par exemple, où il faut chauffer d'abord l'eau après l'air.

On trouve sur le marché des appareils de toutes formes, toutes tailles et couleurs qui s'adaptent à tous les intérieurs. Les appareils peuvent aussi devenir totalement invisibles (chauffage par le sol ou plafond chauffant), laissant ainsi tout le volume habitable disponible.

Le fonctionnement du chauffage peut être automatisé (régulation, prise en compte de la température extérieure, etc.), ce qui permet de ne plus s'en occuper.

## **I.6 Le confort thermique**

L'amélioration du confort de l'occupant, en particulier le confort thermique, est un des objectifs principaux de la régulation dans le bâtiment. La définition de cette notion est alors

indispensable pour la prendre en compte dans l'optimisation, soit sous forme de contrainte à respecter, soit en tant qu'objectif même.

### **I.6.1 Définition du confort thermique**

Le confort thermique correspond à un état d'équilibre thermique et hydrique entre le corps humain et son environnement. Il dépend de l'activité physique, du métabolisme, de l'habillement et de la sensibilité (aspect psychosociologique) de chaque individu, d'une part, et de la température de l'environnement (air, parois), des mouvements d'air et de l'humidité, d'autre part. De plus, le comportement de l'individu aux conditions d'ambiance tend à réduire l'inconfort [6].

### **I.6.2 Les paramètres influant sur le confort thermique**

Comme il a été expliqué auparavant, le confort thermique est une sensation résultant de l'équilibre ou du déséquilibre des échanges de chaleurs entre le corps humain et son environnement. On peut ainsi distinguer deux types de facteurs influant sur le confort thermique : les facteurs personnels décrivant les propriétés thermiques du corps humain et les facteurs environnementaux décrivant les propriétés thermiques de l'environnement.

#### **➤ Température des parois**

L'écart avec la température ambiante doit rester inférieur à 2 à 3 °C, plus la paroi est froide, plus elle absorbe de rayonnements. Pour solutionner, on utilise par exemple des rideaux, des parois opaques isolées, des corps de chauffe en alliage ou bien des parois à doubles vitrages [7].

#### **➤ Température ambiante de l'air ( $T_a$ )**

La température ambiante de l'air est le paramètre le plus influant sur la sensation thermique de l'habitant bien qu'il existe pas mal de paramètres qui ont également des impacts considérables sur la sensation thermique. Néanmoins, ils restent toujours autour de la température ambiante de l'air.

#### **➤ L'humidité relative de l'air (hygrométrie)**

Un taux d'humidité situé entre 40% et 60% permet un bon confort thermique. Avec un taux d'humidité élevé, on aura tendance à augmenter la température de consigne (surconsommation d'énergie). À l'inverse, on aura tendance à diminuer la température de consigne dans un environnement plus sec, mais il n'est pas recommandé de descendre en dessous de 40%. Pour réguler au mieux l'humidité, il est nécessaire de mettre en place une ventilation mécanique contrôlée [8].

### ➤ la vitesse de l'air

La vitesse de l'air est nécessaire dans les milieux d'habitation, sachant qu'elle ne doit pas dépasser le 0.2m/s, De même, il faut noter qu'elle doit être inférieure à 0,15 m/s pendant la période hivernale [9].

### ➤ L'occupant

En fonction de sa sensibilité, de son activité et de sa tenue, l'occupant va également avoir une influence sur le confort thermique. Plus l'occupant a une activité physique soutenue et plus il est habillé chaudement, plus la température de consigne pourra être faible. Porter des pulls en hiver est donc un bon moyen de faire des économies d'énergie.

## I.6.3 Comment obtenir un bon confort thermique

Le confort thermique résulte de nombreux paramètres comme les températures d'ambiance et des parois, les modes de chauffage, le taux d'humidité ou les mouvements d'air. Pour obtenir un confort thermique satisfaisant, il faut agir au niveau du bâti, des systèmes et des occupants. Au niveau du bâti, une isolation suffisante et des fenêtres performantes évitent le phénomène de parois froides et diminuent les mouvements d'air. Au niveau des systèmes, une température de consigne autour de 19-20°C couplée à une bonne régulation et l'utilisation d'une VMC hygroréglable améliorent le confort thermique, tout en limitant les consommations d'énergie. Enfin, au niveau des occupants, une tenue adaptée à la saison est indispensable [10].

## I.7 Pourquoi la simulation des bâtiments

Afin d'améliorer les performances des systèmes de chauffage et de climatisation, il est important d'étudier une stratégie de commande. Ces études peuvent être réalisées sur des bâtiments réels par le biais de l'expérimentation, ou de manière virtuelle, voire une combinaison des deux approches. Cependant, aujourd'hui, l'analyse des performances de nouveaux contrôleurs est plus généralement menée dans des laboratoires virtuels que par l'intermédiaire d'expérimentations réelles. Ceci est dû à plusieurs raisons, entre autres :

- ✓ L'écart entre les investissements en temps et en coût est énorme entre les deux options (simulation et expérimentation).
- ✓ La non-reproductibilité des conditions météorologiques rend difficile la comparaison des différents régulateurs sur le même bâtiment. D'autre part chaque immeuble a ses propres caractéristiques qui le rendent unique.

De nombreux outils de simulation ont été créés afin de contourner les problèmes mentionnés précédemment, tout en offrant des résultats satisfaisants par rapport au cas réel, comme exemple la bibliothèque SIMBAD que nous allons décrire par la suite [4].

## I.8 Bibliothèque de l'outil de simulation SIMBAD

SIMBAD (SIMulateur des bâtiments et des équipements) est une bibliothèque de modèles de composants HVAC développés dans l'environnement graphique Matlab/Simulink. Il est utilisé dans le domaine du contrôle de système de CVC et également utilisé pour le développement de laboratoires virtuels pour la conception et l'essai de systèmes de contrôle dans les bâtiments [11].

La bibliothèque de SIMBAD est structurée en plusieurs modèles (voir Figure I.1) [12].

- **Modèle multizone:** modèle de bâtiment multi zone. La description du bâtiment est réalisée à l'aide d'une interface graphique.
- **Modèles de zone:** modèles de bâtiment mono zone avec des paramètres prédéfinis, modèles avec une description détaillée des parois et des fenêtres ou description zonale de l'ambiance intérieure.
- **Éléments de production:** pompes à chaleur, chaudières.
- **Éléments de distribution:** récupérateurs de chaleur à plaques, vannes, conduits, pompes, gaines d'air.
- **Éléments d'émission:** ventilo-convecteurs, plancher-chauffants, radiateurs, convecteurs électriques.
- **Éléments de régulation:** différents types de régulateurs pour la régulation terminale ou centrale, sondes.

SIMBAD offre également des fichiers météorologiques, des profils d'occupation prédéfinis, un modèle d'éclairage artificiel et des blocs de conversion entre différentes grandeurs physiques [4].

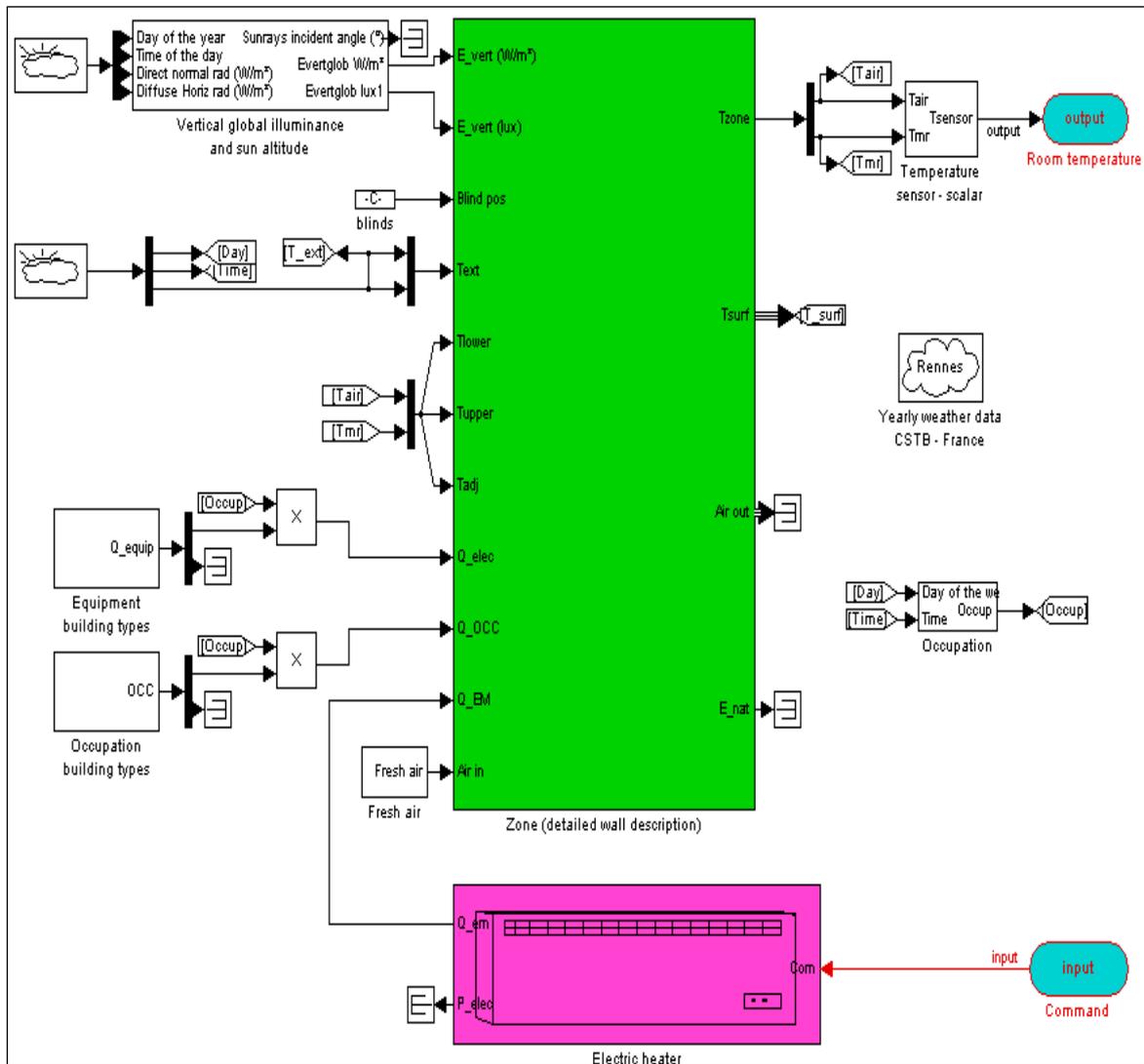


Figure I.1: Le modèle de la pièce utilisée avec le réchauffeur électrique

## I.9 Modèle radiateur électrique

C'est un modèle du premier ordre d'un réchauffeur électrique, il comporte des entrées, des paramètres et des sorties qui sont définies comme suit [13]:

### 1) Entrée :

- **COM** : signal de commande qui a un coefficient de variation linéaire de la puissance donnée au réchauffeur, on le prend entre 0 et 1 où 1 signifie la puissance nominale du réchauffeur.

### 2) Sorties :

- **Flux de la chaleur** : la chaleur distribuée aux environnements [W].
- **P\_elec**: elle nous informe sur la consommation électrique du réchauffeur [W].

### 3) Paramètres du réchauffeur (radiateur) :

- **Type de réchauffeur** : liste de réchauffeur typique.
- **Norme** : réchauffeur électrique commun (radiateur).
- **Réponse rapide** : réchauffeur électrique dans les enroulements de ventilateur, air manipulant des unités.
- **Puis\_nom** : puissance nominale du réchauffeur, les valeurs communes de puissance nominale sont : 500, 750, 1000, 1250, 1500, 1750, 2000.

## I.10 Le modèle de la pièce utilisée

On a opté pour le modèle monozone dont une multitude de paramètres sont considérés parfois comme des perturbations qui influent sur la température ambiante de la pièce, les entrées et sorties du modèle sont décrit comme suit :

### Les entrées :

- $E_{\text{vert}}$  [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] : rayonnement vertical global du soleil.
- $E_{\text{vert}}$  [lux] : illumination verticale globale du soleil.
- Blind pos : position de l'abat-jour (rideau) : prenant une valeur entre 0 et 1.
- $T_{\text{ext}}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] : température venant du milieu extérieur.
- $T_{\text{lower}}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] : la température résultante de la salle adjacente en contact avec le plancher de la salle traitée.
- $T_{\text{upper}}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] : la température résultante de la zone adjacente en contact avec le plafond de la salle traitée.
- $T_{\text{adj}}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] : la température résultante de la zone adjacente en contact avec les murs internes de la salle traitée.
- $Q_{\text{elec}}$  [W] : gain de la chaleur d'équipements électriques à l'intérieur de la pièce.
- $Q_{\text{occ}}$  [W] : gain de la chaleur des occupants dépend de leur activité dans la pièce et de leur nombre.
- $Q_{\text{em}}$  [W] : gain de la chaleur du radiateur.
- $\text{Air}_{\text{in}}$  [ $^{\circ}\text{C}$  - g/kg – PA-kg/s] : vecteur décrivant la circulation d'air entrant dans la pièce.

**Les sorties :**

- $T_{zone}$  [°C] : la température de zone.
- $T_{surf}$  [°C] : vecteur des températures de surface internes dans la zone.
- $Air_{out}$  [°C, g/kg, PA, kg/s]: vecteur d'air partant de la pièce.
- $E_{nat}$  [lux] : éclairage normal dans la zone.

**I.11 Conditions météorologiques**

Le modèle du bâtiment (pièce) virtuel que nous allons considérer dans les simulations, est situé à Rennes en France. Les données météo utilisées pour simuler l'environnement dans lequel la pièce est placée retracent les conditions climatiques mesurées pour la ville. Les perturbations extérieures prises en compte par le modèle sont la température de l'air extérieur, le rayonnement solaire direct et diffus, pendant la période d'hiver.

**I.11.1 Les caractéristiques de la pièce**

La pièce choisit est un bureau, dont la période d'occupation est entre 8 h et 17h, du lundi au vendredi. Les autres paramètres sont décrits dans le tableau ci-dessous :

**Tableau I-3:** Représentation des caractéristiques du bureau.

Désignation et facteur de transfert thermique	Dimension
Longueur de zone	4m
Largeur de zone	3m
Taille de zone	3m
Longueur de fenêtre	2m
Taille de fenêtre	1m
Coefficient de transfert thermique de mur	0.384261 W/m <sup>2</sup> /K
Coefficient de transfert thermique de plancher	0.4252315 W/m <sup>2</sup> /K
Coefficient de transfert thermique de plafond	0.3301951 W/m <sup>2</sup> /K
La température initiale	10°C
La température de référence pendant l'occupation	19°C
Puissance nominal de réchauffeur électrique	1500W

## I.12 Simulation du système sans régulation

L'objectif de la simulation en boucle ouverte est d'observer la réponse du système de chauffage qui est la température ambiante de la pièce traitée par rapport au signal d'entrée (puissance de chauffage) ainsi qu'aux variations des différents facteurs qui agissent sur le système.

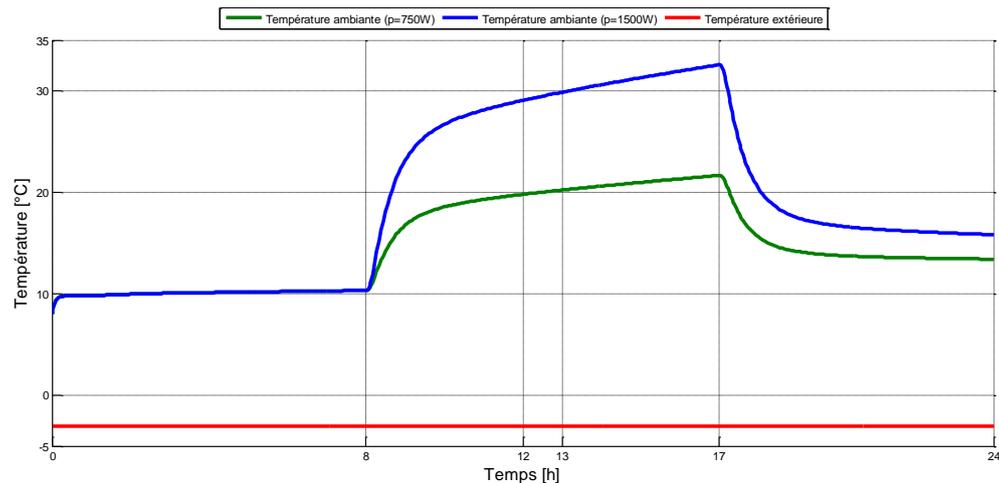
### a) Premier cas

**Les entrées sont fixes :** dans ce cas, notre système est isolé, cela veut dire que le rayonnement solaire n'influe pas sur la pièce, il n'y a pas de chaleurs dégagés par les occupants et les équipements, d'autres facteurs sont illustrés dans le tableau ci-dessous :

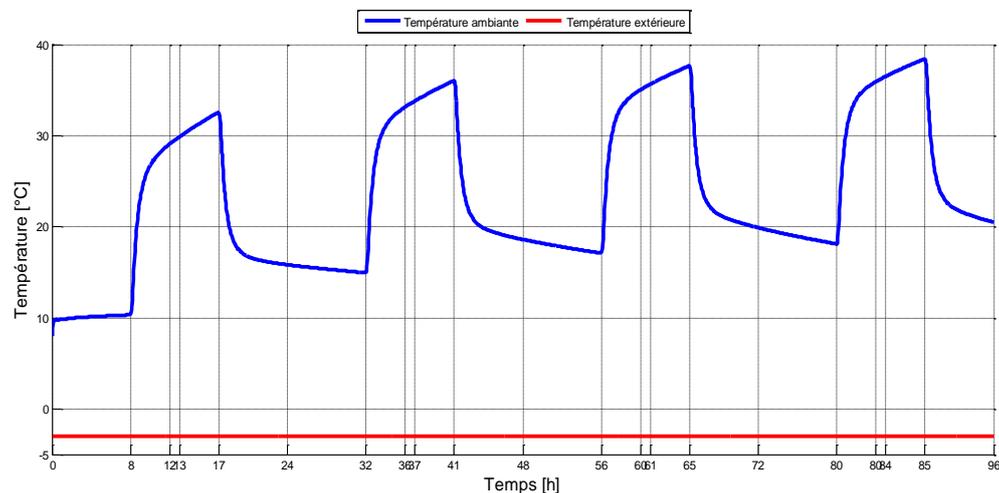
**Tableau I-4:** La représentation des entrées du système utilisées.

Entrées	Valeurs
$E_{\text{vert}}$ [W/m <sup>2</sup> ]	(pas de radiations)
$E_{\text{vert}}$ [lux]	(pas d'illuminations)
Blind_pos	(Rideau fermé)
$T_{\text{ext}}$ [°C]	[-3 -3] (vecteur de la température extérieure)
( $T_{\text{upper}}$ , $T_{\text{lower}}$ , $T_{\text{adj}}$ ) [°C]	[18 18]
$Q_{\text{elec}}$ [W]	pas de chaleur dégagée par les équipements électriques
$Q_{\text{occ}}$ [W]	pas de chaleur dégagée par les occupants
Air <sub>in</sub>	pas de circulation d'air dans la pièce
Intervalle d'occupation	8h00 : 17h00
Temps de simulation	1 jour et 4 jours
Données de la météo	Rennes
Saturation	0.5

On a effectué des simulations pour une journée en variant les puissances nominales et pour quatre jours, on a obtenu les figures (I.2) et (I.3) représentées ci-dessous :



**Figure I.2:** Allure de la sortie du système en boucle ouverte (1 jour)



**Figure I.3:** Allure de la sortie du système (quatre jours)

## Discussion des résultats

D'après la figure (I.2) :

- ✓ On constate qu'à 8h du matin la température initiale est égale à (10°C), après une demi-heure elle atteint une valeur de (19°C), à partir de cette heure la température continue d'augmenter légèrement jusqu'à une valeur maximale de (32.5°C) à 17h, cela revient à l'influence des paramètres de la pièce sur la température. À partir de 17h, la courbe de la température diminue d'une valeur importante (18°C) après l'extinction du chauffage.
- ✓ Lorsqu'on diminue la puissance du chauffage à 750W, on remarque que la courbe a la même allure que la précédente mais avec des valeurs atténuées de (9°C).

D'après la figure (I.3) on voit bien que la réponse du système pour quatre jours est similaire à la réponse pour une journée, juste une légère différence des valeurs initiales et maximales, cela est dû à la chaleur emmagasinée durant le premier jour, on aura donc forcément une augmentation de la valeur maximale.

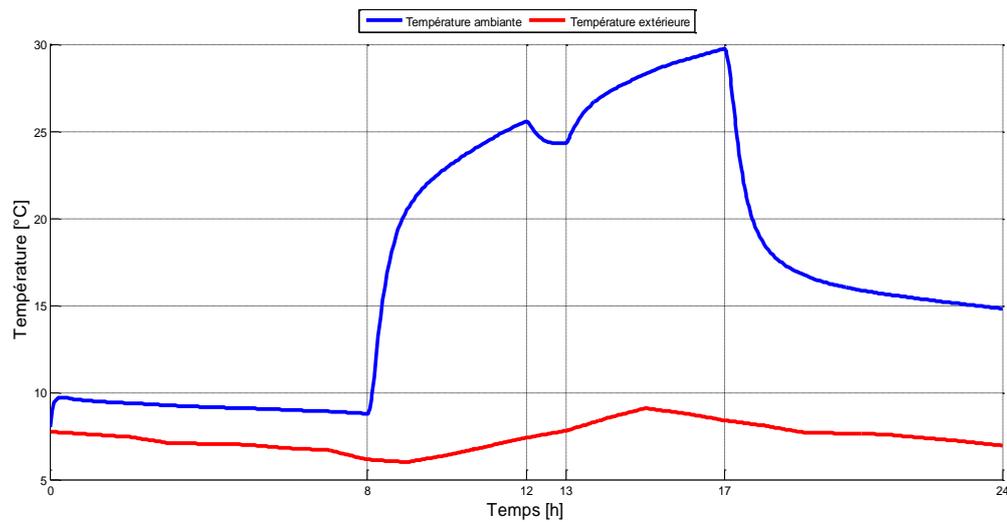
### b) Deuxième cas

**Les entrées sont variables :** le système est relié aux fichiers météorologiques, donc on a l'influence de tous les facteurs sur la température ambiante de la pièce dont le rayonnement soleil, ainsi la variation de la température extérieure; la variation de la température des murs ; du plafond et la pénétration d'air dans la pièce.

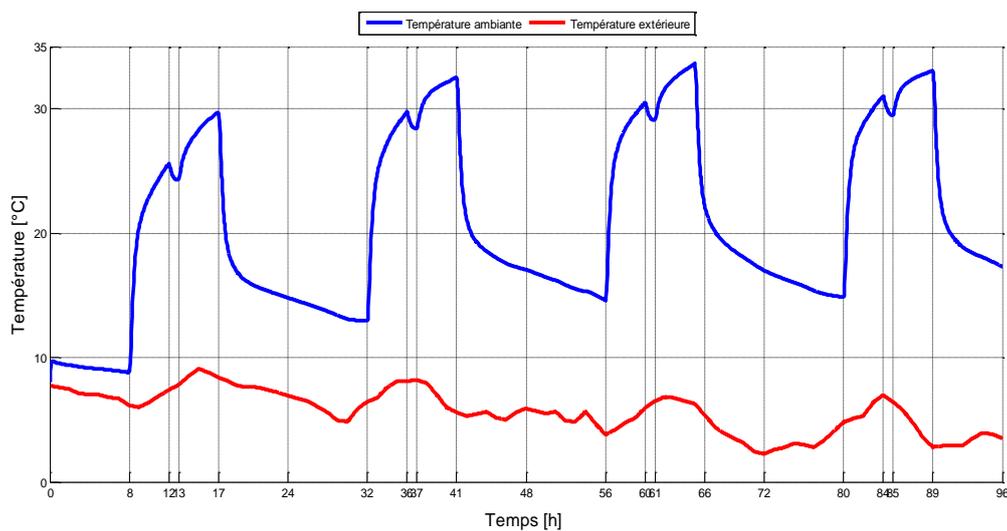
**Tableau I-5:** Les entrées variables

Entrées	Valeurs
E_vert [W/m <sup>2</sup> ], E_vert [lux]	Connectées à la météo
Blind_pos	1 ouvert la journée 0 fermé la nuit
T_ext [°C]	La température extérieure.
T_upper [°C]	La température résultante de la zone adjacente en contact avec le plafond.
T_lower [°C]	La température résultante de la zone adjacente en contact avec le plancher.
T_adj [°C]	La température résultante de la zone adjacente en contact avec le mur.
Q_elec [W]	Gain de chaleur des équipements électrique
Q_occ [W]	Gain de chaleur des occupants
Air <sub>in</sub>	Connecté à la météo (variable)
Intervalle d'occupation	8h00 : 17h00
Temps de simulation	1 jour et 4 jours
Données de la météo	Rennes
Saturation	0.5

Après la simulation, on a obtenu les figures suivantes :



**Figure I.4:** Allure de la sortie du système en boucle ouverte (1 jour)



**Figure I.5:** Allure de la sortie du système (4 jours)

### Discussion des résultats

D'après la figure ci-dessus on voit que la température de la pièce atteint une valeur ( $26^{\circ}\text{C}$ ) à midi et cela est due aux entrées variables qui dépendent de la température extérieure qui est reliée à la météo, après elle chute de ( $2^{\circ}\text{C}$ ) entre (midi et 13h) car on a l'absence des occupants. À partir de 13h elle continue d'augmenter jusqu' à une valeur maximale qu'est ( $29.9^{\circ}\text{C}$ ).

On remarque d'après la figure (I.5) que les allures des courbes sont identiques à celle d'une seule journée répétée quatre fois, mais avec une variation des amplitudes (température initiale, température maximale).

### I.13 Le but de la commande

L'objectif primordial du système de commande du chauffage dans un bâtiment est d'assurer un certain niveau de confort thermique tout en minimisant la consommation d'énergie nécessaire pour le réaliser.

- a) **Objectif de confort** : maintenir le confort des occupants autour d'une température qui est égale à la température de référence  $T_{ref}$ .
- b) **Objectif de consommation** : qui est la réduction de l'énergie consommée.
- c) **Stabilité de la température** : diminuer les oscillations (fluctuations) de la température.

Pour cela nous allons définir quelques indices :

- ✓ **L'indice de confort** : il pénalise l'écart entre la température de la pièce et la température de référence, mais uniquement lors des périodes d'occupation de la pièce, il est donné par la relation suivante :

$$Ic = \int_{t_0}^{t_f} |y_{réf}(t) - y(t)| dt \quad [^{\circ}C \cdot h] \quad (I.1)$$

Avec :  $[t_0 \ t_f]$  : la période d'occupation.

$y_{réf}(t)$  : Signal du modèle de référence.

$y(t)$  : Sortie du système de chauffage.

- ✓ **L'indice de consommation** : pour mesurer la consommation énergétique dans le but de réduire cet indice, on a la relation suivante :

$$Iw = \int_{t_0}^{t_f} P(t) dt \quad [KWh] \quad (I.2)$$

$P(t)$ : Puissance électrique consommée par le radiateur.

- ✓ **L'indice de stabilité de la température** : il mesure les oscillations de la température et se construit à partir des écarts entre les maximums locaux de la température de la pièce et de la température désirée, pour chaque période d'occupation  $\vartheta_i$ . Ce qui donne en  $[^{\circ}C]$  :

$$TSI = \sum_i local \max_{t \in \vartheta_i} (|y_{réf}(t) - y(t)|) \quad (I.3)$$

- ✓ **L'indice de stabilité de la commande** : Correspondant à une moyenne pondérée de la variation de commande, il dépend de la période d'échantillonnage  $T_s$ , il est donné par la relation suivante :

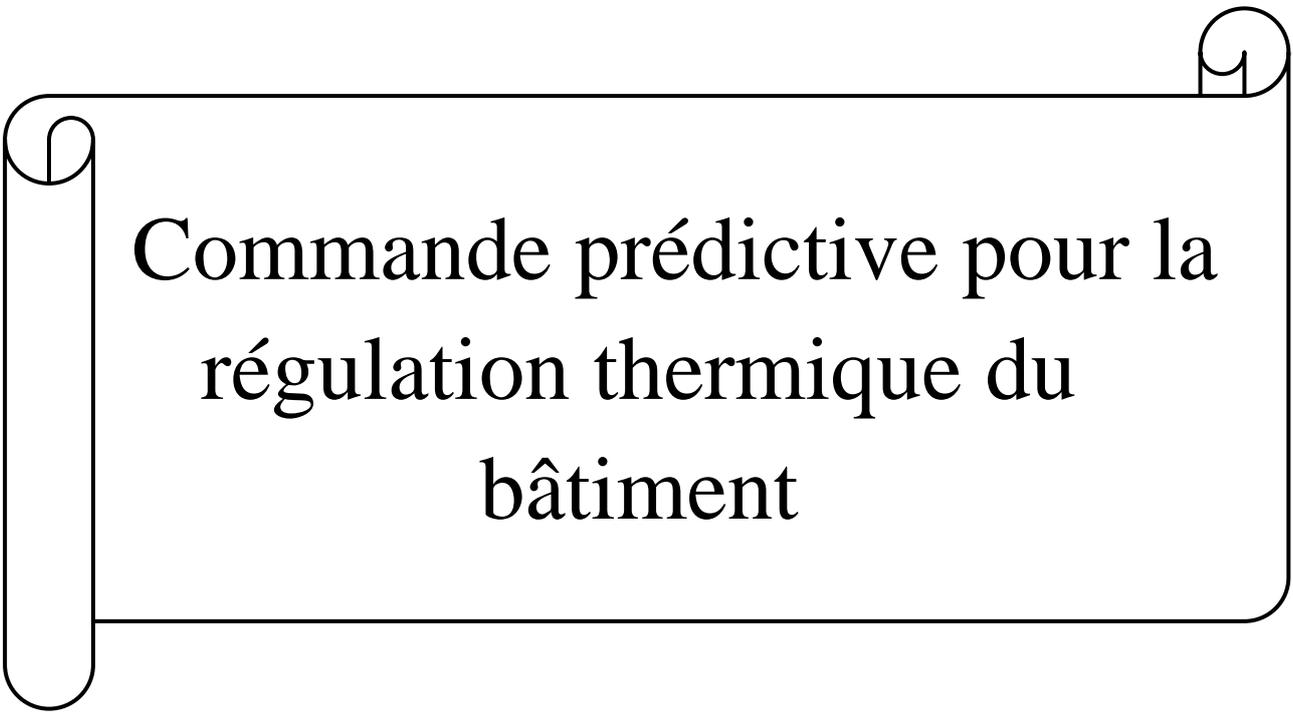
$$CSI = \underbrace{moy_t(|u(t+1) - u(t)|)}_{T_s} \quad (I.4)$$

## I.14 Conclusion

La simulation en boucle ouverte du système chauffage bâtiment, nous a permis de constater que plusieurs paramètres peuvent influencer sur la température de la pièce et que la sortie du système subit des variations importantes au court du temps qui sont dues à des paramètres climatiques et géométriques.

Pour répondre aux objectifs du confort thermique et la consommation énergétique, nous allons concevoir une commande optimale qui est la commande prédictive qui fera l'objet du chapitre qui suit.

## CHAPITRE II

A decorative scroll frame with a black outline and rounded corners. The frame is open on the left side, suggesting a scroll. The text is centered within the frame.

# Commande prédictive pour la régulation thermique du bâtiment

## **CHAPITRE II: Commande prédictive pour la régulation thermique du bâtiment**

### **II.1 Introduction**

De toutes les commandes dites avancées, la commande prédictive est la plus utilisée dans l'industrie, aussi bien pour les qualités techniques auxquelles elle doit ses performances que pour sa facilité de mise en œuvre. L'objectif général de toute structure de commande est de maintenir les variables de sortie proches de leurs consignes tout en respectant les contraintes opératoires du procédé. La commande prédictive a été conçue pour remplir ces buts [14].

Au cours des dernières années, la commande prédictive a été accordée pour réduire et optimiser la consommation d'énergie dans les chauffages et la climatisation à savoir pour faire face à la régulation de la température de consigne. Elle peut aussi naturellement traiter les prédictions observées pour améliorer le confort thermique du bâtiment et réduire les coûts énergétiques totaux [15].

L'ossature de ce chapitre est de donner un aperçu global sur la commande prédictive. Par la suite, on s'attardera sur l'approche prédictive fonctionnelle tout en présentant son principe de fonctionnement, ainsi le calcul de la commande. Enfin, on termine par une application de cette dernière sur différents systèmes dans le but d'évaluer ses performances.

### **II.2 La commande prédictive**

La commande prédictive est une technique de commande avancée de l'automatique. Elle a pour objectif de commander des systèmes industriels complexes. Le principe de cette technique est d'utiliser un modèle dynamique du processus à l'intérieur du contrôleur en temps réel afin d'anticiper le futur comportement du procédé.

La commande prédictive se différencie des autres techniques de commande par le fait qu'elle doit être résolue en ligne, elle consiste à optimiser, à partir des entrées/sorties d'un système, le comportement futur prédit du système considéré. La prédiction est faite à partir d'un modèle interne du système sur un intervalle de temps fini appelé horizon de prédiction. La solution du problème d'optimisation est un vecteur de commande dont la première entrée de la séquence optimale est injectée au système. Le problème est à nouveau résolu sur l'intervalle de temps suivant en utilisant les données du système mises à jour [16].

### II.3 Principe de la commande prédictive

La méthode est basée sur la connaissance d'un modèle du processus et nécessite l'utilisation d'un calculateur numérique.

Le problème est, connaissant la sortie du processus à commander, de déterminer la commande permettant de lui faire rallier la consigne selon une trajectoire prédéfinie initialisée à chaque instant sur la sortie du processus, elle est appelée trajectoire de référence ou trajectoire désirée (voir la figure ci-dessous).

La méthode consiste à déterminer la séquence future et commande à appliquer à l'entrée du processus en vue de forcer la sortie à suivre la trajectoire de référence (en général une trajectoire du premier ou second ordre). Seule la première commande est appliquée, le calcul étant réinitialisé à chaque pas.

Cette méthode nécessite d'être capable de prédire l'effet futur de toute séquence de commande sur la sortie du processus implanté dans le calculateur (modèle interne) [17].

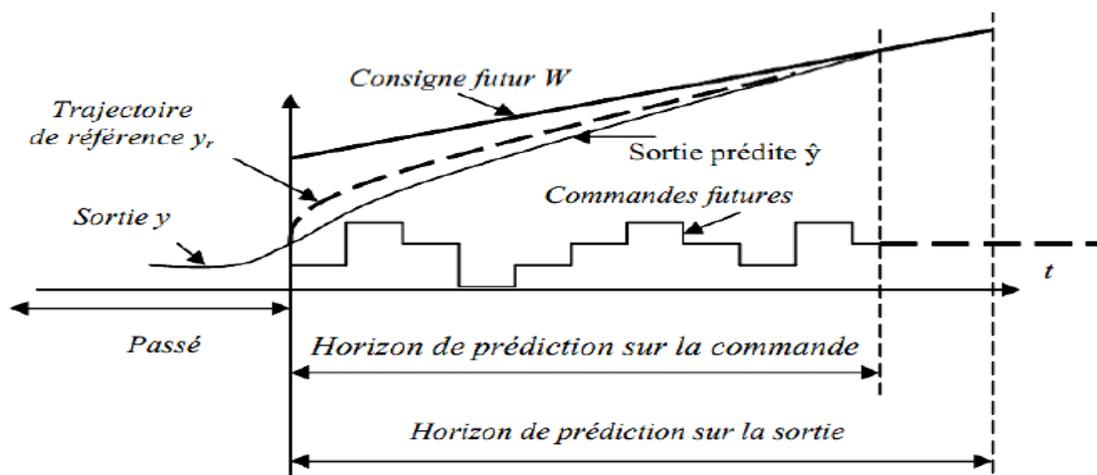


Figure II.1: Stratégie de la commande prédictive

### II.4 Les différentes techniques de la commande prédictive

La commande prédictive est un terme général qui englobe un ensemble de méthodes différentes. Néanmoins, toutes ces techniques utilisent la même philosophie de contrôle et le principe de fonctionnement est le même, et ne diffèrent entre elles que par le modèle utilisé, parmi ces techniques on trouve :

- ✓ DMC, développée en 1980 par Culer et Ramaker.
- ✓ GPC, décrite par D.W. Clarke et al. en 1980.
- ✓ PFC, introduite, au milieu de la décennie 1980, par J. Richalet et al [18].

## II.5 Avantages et inconvénients de la commande prédictive

La commande prédictive présente un certain nombre d'avantages, par rapport aux autres méthodes, parmi lesquels on trouve :

- ✓ Son principe intuitif et le réglage relativement facile de ses paramètres la rendent accessible aux personnes avec des connaissances limitées en automatique.
- ✓ Elle peut être utilisée pour commander une grande variété de processus, ceux avec des dynamiques simples à ceux plus complexes.
- ✓ Elle est capable intrinsèquement de compenser les retards ou les temps morts.
- ✓ Le correcteur obtenu est une loi de commande linéaire facile à implémenter et qui requiert peu de temps de calcul.
- ✓ Le traitement de contraintes sur le système à commander peut être inclus systématiquement dans la définition du correcteur.
- ✓ Elle est très utile lorsque les consignes à suivre sont connues à l'avance [19].

Cependant, la commande prédictive présente certains inconvénients :

- ✓ L'obtention de la loi de commande demande un effort de calcul beaucoup plus grand que dans le cas d'une commande classique.
- ✓ Lorsque des contraintes d'opération sont prises en considération, la solution devient itérative et les temps de calculs peuvent devenir très importants.
- ✓ Dans le cas adaptatif, tous les calculs pour obtenir la loi de commande doivent être repris à chaque période d'échantillonnage [20].

## II.6 La commande prédictive fonctionnelle (PFC)

La commande prédictive fonctionnelle a été conçue dans le but de résoudre des problèmes de commande pour des procédés de complexité moyenne. Dans l'industrie, PFC a connu un grand succès comparativement à d'autres stratégies de commande MPC.

Elle utilise un modèle non-aligné (indépendant) divisé en deux parties : l'une autorégressive et l'autre forcée. La réponse forcée est projetée sur une base de fonction.

L'objectif est de rallier la sortie du processus vers la consigne dans le futur. Le calcul de prédiction est réalisé avec l'aide d'un modèle numérique du processus que l'on veut commander. Le calcul des termes futurs de la commande est réalisé sur un horizon de prédiction

formé d'une séquence de points que l'on nomme points de coïncidence. La sortie prédite est alors sensée coïncider avec une trajectoire de référence [21].

Pour mettre en place une telle commande, nous devons suivre les étapes suivantes [22].

- ✓ Obtenir et représenter le modèle du système.
- ✓ Rechercher la formule de prédiction (dite parfois prédicteur).
- ✓ l'obtention de l'expression analytique de la commande à appliquer.

Le principe de cette commande se structure autour de quatre notions essentielles [23] :

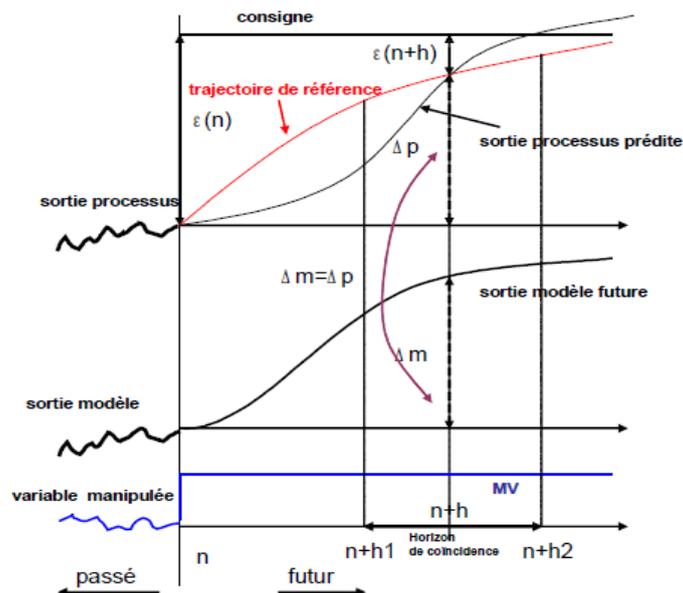
1. le modèle.
2. la trajectoire de référence.
3. la commande structurée.
4. la compensation de l'erreur modèle-processus (auto-compensateur).

## II.7 Principe de la commande prédictive fonctionnelle

En général, on considère le système à réguler comme un système modélisable suivant la représentation ARMA :

$$y(k) = \sum_{i=1}^n a_i y_p(k-i) + \sum_{j=1}^m b_j u(k-j) \quad (\text{II.1})$$

Ensuite la PFC se base sur des principes qui lui sont propres pour sa mise en œuvre.



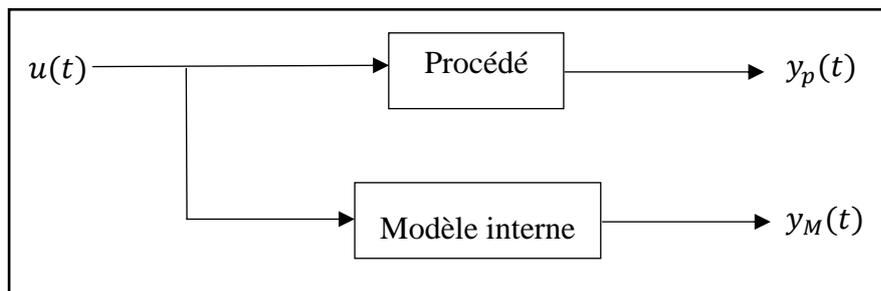
**Figure II.2** : Principe de la commande prédictive fonctionnelle PFC [24]

### II.7.1 Modèle interne

Le comportement d'un procédé va être simulé par un modèle interne. Il est dit interne car il est situé dans la commande. Les paramètres de ce modèle s'obtiennent par différentes techniques de modélisation et/ou d'identification du procédé.

Le but est de connaître le comportement futur du processus si on le soumet à une certaine entrée [25].

La figure (II.3) montre que pour une commande  $u(t)$ , on peut comparer les réponses du modèle  $y_M(t)$  et du procédé  $y_P(t)$ .



**Figure II.3:** Modèle interne : situation parallèle avec procédé

Alors, le modèle est implanté sous forme discrète : équation aux différences finies, la fonction de transfert en continu du processus modélisé  $G(p)$  est donnée par la relation suivante :

$$G(p) = \frac{\text{sortie procédé}}{\text{entrée procédé}} = \frac{K_M e^{-rp}}{1 + \tau p} = \frac{y_M(t)}{u_p(t)} \quad (\text{II. 2})$$

Où  $p$  désigne la variable de Laplace,  $K_M$  représente le gain statique,  $r$  le retard pur et  $\tau$  la constante de temps du modèle.

### II.7.2 Trajectoire de référence

La consigne est l'objectif final de la commande, mais cette spécification n'est pas suffisante et il convient de définir comment atteindre cette consigne. La trajectoire de référence est le chemin futur que l'on souhaiterait idéalement que le processus régulé emprunte afin d'atteindre la consigne imposée. C'est elle qui va imposer la dynamique de la boucle fermée.

### II.7.3 Horizon de coïncidence

Il est nécessaire de définir un intervalle de temps  $[H1, H2]$  dans lequel on trouvera au minimum un point de coïncidence entre la trajectoire de référence connue et la sortie du procédé.

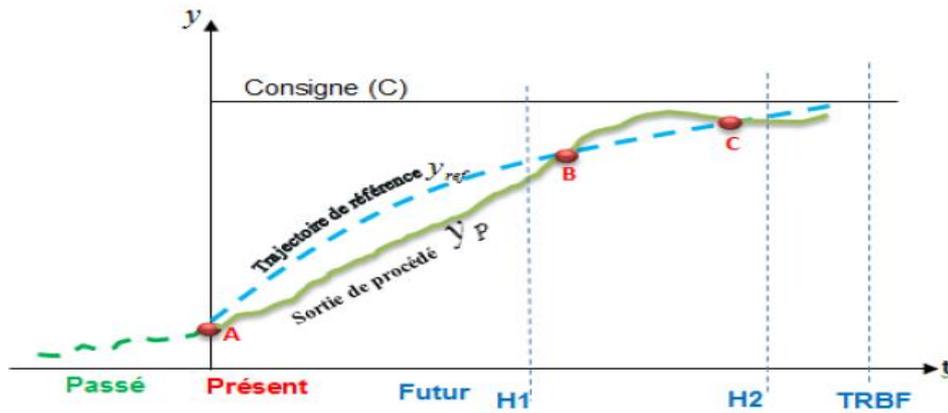


Figure II.4: Points de coïncidence

Dans la figure (2.4), les points B et C sont les points de coïncidence entre la trajectoire de référence  $y_{ref}(t)$  et la sortie du procédé  $y_p(t)$  dans l'intervalle  $[H1, H2]$ .

#### II.7.4 Objectif de la commande

On considère que l'incrément de la sortie du procédé au point de coïncidence se présente par la relation suivante :

$$\Delta_p(k) = y_p(k + H) - y_p(k) \quad (\text{II. 3})$$

Où  $k$  représente l'instant présent.

Comme d'autre part, le modèle simule le comportement du procédé, on peut également fixer l'incrément désiré dans l'espace du modèle.

$$\Delta_M(k) = y_M(k + H) - y_M(k) \quad (\text{II. 4})$$

Au final, la commande à appliquer au procédé s'obtient à partir de l'égalité entre les deux incréments présentés, c'est-à-dire :

$$\Delta_p(k) = \Delta_M(k) \quad (\text{II. 5})$$

### II.8 Le calcul de la commande

Une des caractéristiques de la commande PFC est la structuration de la loi de commande.

Cela correspond à choisir le type de signal de consigne parmi des fonctions de base du type échelon, rampe, parabole etc. Ces fonctions de base sont utilisées dans la partie prédiction de la commande prédictive.

Comme mentionné précédemment, la commande prédictive s'obtient à partir de l'égalité entre la trajectoire de référence et la sortie prédite du processus en un point de coïncidence  $H$ .

Ainsi la relation (II.5) permet de trouver l'expression de la commande.

Soit le modèle :

$$G(p) = \frac{\text{sortie procédé}}{\text{entrée procédé}} = \frac{K_p e^{-\tau_p p}}{1 + \tau_p p} = \frac{y_p(t)}{u_p(t)} \quad (\text{II. 6})$$

$$G_p(z^{-1}) = \frac{K_M(1 - e^{-T_e/\tau})z^{-1}}{1 - e^{-T_e/\tau}z^{-1}} z^{-n_r} = \frac{y_M(z^{-1})}{u(z^{-1})} \quad (\text{II. 7})$$

Où  $T_e$  est la période d'échantillonnage et  $n_r$  un entier correspondant au nombre entier de périodes comprises dans le retard.

Du modèle échantillonné précédent, en se rappelant que  $z^{-1}$  est équivalent à un retard d'un échantillon et en notant  $\alpha = e^{-T_e/\tau}$  (où  $\tau$  est la constante de temps), il vient :

$$y_p(k) = \alpha y_p(k-1) + K_M(1 - \alpha)u(k-1-n_r) \quad (\text{II. 8})$$

En procédant de même sur le modèle non retardé, on peut écrire :

$$y_M(k) = \alpha y_M(k-1) + K_M(1 - \alpha)u(k-1) \quad (\text{II. 9})$$

Si on considère la commande comme constante à une valeur  $u(k)$  après son application à l'instant  $k$ , on a :

$$u(k+1) = u(k+2) = \dots = u(k+H) = u(k) \quad (\text{II. 10})$$

Il s'avère donc possible de calculer la sortie à l'instant  $k+H$  en incrémentant la relation

$$y_M(k+2) = \alpha y_M(k+1) + K_M(1 - \alpha)u(k+1) \quad (\text{II. 11})$$

Ce qui peut s'écrire :

$$\begin{aligned} y_M(k+2) &= \alpha[\alpha y_M(k) + K_M(1 - \alpha)u(k)] + K_M(1 - \alpha)u(k) \\ &= \alpha^2 y_M(k) + (\alpha + 1)K_M(1 - \alpha)u(k) \\ &= \alpha^2 y_M(k) + K_M(1 - \alpha^2)u(k) \end{aligned} \quad (\text{II. 12})$$

De la même manière on incrémente de 1 la relation (II.11), on obtient :

$$y_M(k+3) = \alpha^3 y_M(k) + K_M(1 - \alpha^3)u(k) \quad (\text{II. 13})$$

Cette démarche conduit à l'équation du prédicteur :

$$y_M(k+H) = \alpha^H y_M(k) + K_M(1 - \alpha^H)u(k) \quad (\text{II. 14})$$

La trajectoire de référence peut être fixée en précisant le temps de réponse désiré en boucle fermée ( $T_{Bf}$ ) et en choisissant une décroissance exponentielle de l'écart. On note que le temps de réponse en boucle fermée se présente à 95% de la valeur finale.

En utilisant les notations de la figure (II.4), on peut écrire :

$$\varepsilon(k) = C - y_{ref}(k) \quad (II.15)$$

Où  $\varepsilon(k)$  est l'écart entre la consigne  $C$  et la trajectoire de référence à l'instant  $k$ .

La trajectoire de référence est choisie de forme exponentielle, le décrement de l'écart entre la consigne et la sortie est donnée par :

$$\varepsilon(k + H) = \varepsilon(k)e^{-TeH/\tau_{bf}} = \varepsilon(k)\lambda^H \quad (II.16)$$

Avec  $\lambda = e^{-TeH/\tau_{bf}}$  et  $\tau_{bf}$  représente la constante du temps de la trajectoire de référence.

Si l'on suppose qu'à l'instant  $k + H$  il y a bien coïncidence entre la sortie du procédé et la trajectoire de référence, dans ces conditions, l'incrément de la sortie du procédé  $\Delta_p(k)$  peut être déterminé par :

$$\Delta_p(k) = y_{ref}(k + H) - y_{ref}(k) = C - \varepsilon(k + H) - y_{ref}(k) \quad (II.17)$$

En utilisant les relations (II.15) puis (II.16) l'expression de l'incrément de la sortie devient:

$$\Delta_p(k) = (1 - \lambda^H)(C - y_{ref}(k)) \quad (II.18)$$

Compte tenu de la coïncidence entre les deux trajectoires en  $k + H$ ,  $y_{ref}$  peut être remplacé par la mesure de la sortie du procédé dans l'équation (II.18).

De la même façon que pour le procédé, on peut déterminer l'incrément de la sortie du modèle en utilisant l'équation (II.14) :

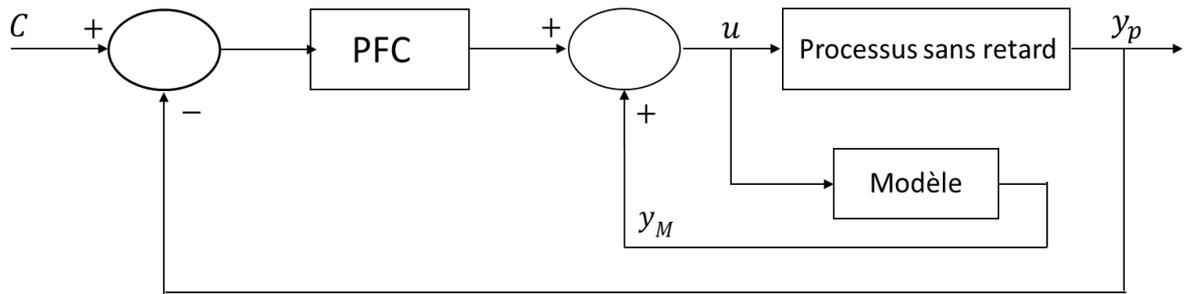
$$\Delta_M(k) = y_M(k + H) - y_M(k)$$

$$\Delta_M(k) = (1 - \alpha^H)k_M u(k) - y_M(k)(1 - \alpha^H) \quad (II.19)$$

Comme l'objectif est d'avoir  $\Delta_p(k) = \Delta_M(k)$ , on peut tirer des équations (II.17) et (II.18) l'expression de la commande  $u$  :

$$u = \frac{(1 - \lambda^H)(C(k) - y_p(k))}{(1 - \alpha^H)k_M} + \frac{y_M}{k_M} \quad (II.20)$$

Cette commande correspond au schéma décrit dans la figure (II.5)

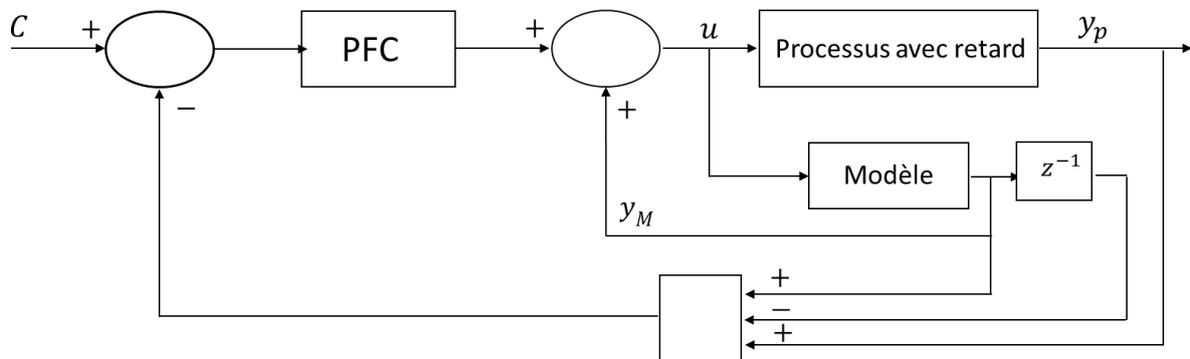


**Figure II.5:** Schéma bloc de la commande PFC sans retard pur

Si l'on désire prendre en compte un retard dans le procédé, on peut considérer les retards purs sur le procédé et le modèle comme étant mis en série sur les sorties. En supposant une identification correcte du retard pur, la sortie retardée du procédé ( $y_{p\ ret}$ ) peut être évaluée par la relation suivante :

$$y_{p\ ret} = y_p(k) - (y_M(k) - y_M(k - r)) \quad (\text{II. 21})$$

Ainsi on peut estimer le signal  $y_p(k)$  qui est nécessaire pour la commande, le nouveau schéma de contrôle est décrit à la figure (II.6).



**Figure II.6:** Schéma bloc de la commande PFC avec retard pur

## II.9 Paramètres nécessaires à la mise en œuvre de la PFC

Le paragraphe précédent permet de déterminer la forme de la loi de commande, la constante de temps en boucle fermée ( $\tau_{bf}$ ) et l'horizon de coïncidence sont nécessaires au calcul final.

Ces paramètres sont définis comme suit :

Notons tout d'abord que le temps de réponse en boucle ouverte ( $T_{Bo}$ ) est défini à partir de la constante de temps du modèle:  $T_{Bo} = 3\tau$

Si l'on définit un facteur d'accélération de la réponse appelé  $F_{accel}$ , ce facteur permet de préciser le temps de réponse désiré en boucle fermée par la relation:  $T_{Bf} = \frac{T_{Bo}}{F_{accel}}$

avec :  $1 < F_{accel} < 3$

Ainsi la constante de temps en boucle fermée est obtenue par :  $\tau_{bf} = \frac{T_{Bf}}{3}$

Pour finir, le point de coïncidence  $H$  est pris égal à :  $H = \text{ceil}\left(\frac{\tau_{bf}}{3T_e}\right)$

Trois d'autres paramètres restent à trouver pour que le calcul de la commande soit complet :  $k_M$  Gain statique,  $\tau$  constante de temps et  $r$  retard pur. L'idée retenue est d'obtenir ces paramètres par un modèle interne physique .

## II.10 La commande PFC d'un système d'ordre élevé

Pour un processus d'ordre élevé, la représentation de la fonction de transfert est basée sur une décomposition parallèle et est donnée par [26] :

$$G_M(p) = \sum_{i=1}^m \frac{k_i}{1 + T_i p} \quad (\text{II. 22})$$

### a) Prédiction de la sortie

La sortie du modèle  $y_M(k)$  est :

$$y_M(k) = y_1 + y_2 + \dots + y_m \quad (\text{II. 23})$$

L'équation aux différences de la sortie:

$$y_i(k) = a_i y_i(k-1) + k_i(1 - a_i)u(k-1) \quad (\text{II. 24})$$

Avec :  $1 < i < m$  et  $a_i = e^{-T_i/T_e}$

D'où on a :

$$y_M(k) = \sum_{i=1}^m a_i y_i(k-1) + \sum_{i=1}^m k_i(1 - a_i)u(k-1) \quad (\text{II. 25})$$

La réponse  $y_M(k)$  peut-être donc divisée en deux parties, l'équation (II.26) représente la réponse libre et l'équation (II.27) la réponse forcée.

$$y_L(k + H) = \sum_{i=1}^m a_i^H y_i(k) \quad (\text{II. 26})$$

$$y_F(k + H) = \sum_{i=1}^m k_i(1 - a_i) u(k) \quad (\text{II. 27})$$

### b) Formulation de la trajectoire de référence

La sortie du système est spécifiée par la trajectoire de référence, initialisée sur la sortie réelle du système  $y_p$  et la valeur de la consigne  $C$ .

La trajectoire de référence est donnée par :

$$y_{réf}(k + H) = C(k) - \lambda^H(C(k) - y_p(k)) \quad (\text{II. 28})$$

La sortie estimée du système  $y_p$  à l'instant est mise égale à la trajectoire de référence, nous avons

$$y_{réf}(k + H) = y_p(k + H) \quad (\text{II. 29})$$

D'où la sortie estimée du système à l'instant  $k + H$  est :

$$y_p(k + H) = y_M(k + H) + y_p(k) - y_M(k) \quad (\text{II. 30})$$

En remplaçant  $y_M(k + H)$  par son expression de (2.24), nous obtenons

$$y_p(k + H) = \sum_{i=1}^m y_i(k + H) + (y_p(k) - \sum_{i=1}^m y_i(k)) \quad (\text{II. 31})$$

### c) Calcul de la commande

Au point de coïncidence,  $y_{réf}(k + H) = y_p(k + H)$  en utilisant un échelon d'entrée comme fonction de base, ainsi les équations (II.26) (II.27) (II.31), on obtient :

$$\begin{aligned} C(k)(1 - \lambda^H) - y_p(k)(1 - \lambda^H) + y_1(k)(1 - a_1^H) + y_2(k)(1 - a_2^H) + \dots + y_m(k)(1 - a_m^H) \\ = (k_1(k)(1 - a_1^H) + k_2(k)(1 - a_2^H) + \dots + k_m(k)(1 - a_m^H))u(k) \end{aligned} \quad (\text{II. 32})$$

D'après l'équation (II.32) la loi de commande  $u(k)$  est :

$$u = \frac{(1 - \lambda^H)(C(k) - y_p(k))}{\sum_{i=1}^m k_i (1 - a_i^H)} + \frac{\sum_{i=1}^m y_i(k)(1 - a_i^H)}{\sum_{i=1}^m k_i (1 - a_i^H)} \quad (\text{II. 33})$$

## II.11 Simulation d'un processus du 1<sup>er</sup> ordre (Cas : circuit RC)

Pour l'évaluation de la commande prédictive fonctionnelle on considère un système physique qui est un circuit RC simple dont la relation entrée  $e(t) \rightarrow$  sortie  $u(t)$  peut être décrite par une équation différentielle du premier ordre.

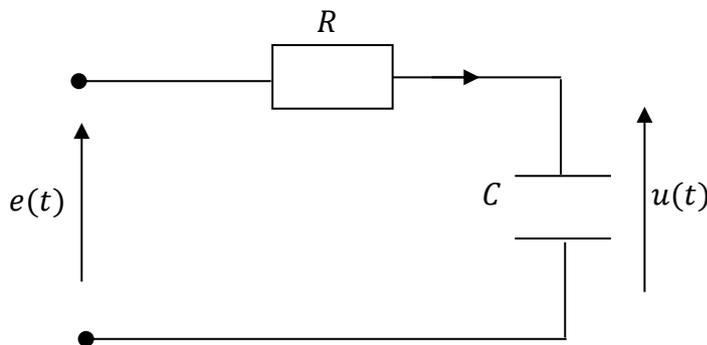
$$R.C. \frac{du}{dt} + u(t) = e(t) \quad (\text{II. 34})$$

Pour simuler la réponse du circuit RC au signal d'entrée  $e(t)$ , on a :

Le circuit électrique suivant :

Avec:  $e(t)$ : Tension d'alimentation.

$u(t)$ : Tension aux bornes de condensateur.



### Valeurs des composants:

$R = 2,2 \text{ k}\Omega$ .

$C = 220 \text{ nF}$ .

$e(t) = \text{échelon de } 5\text{V}$ .

$f=200\text{Hz}$ .

La fonction de transfert du système :  $G(p) = \frac{k}{\tau p + 1}$

Les paramètres du modèle :

$$k = 1; \quad \tau = 484.10^{-6}; \quad T_e = 5\text{ms}$$

$$G(z^{-1}) = \frac{z^{-1}}{1 - 3.262 \cdot 10^{-5} z^{-1}}$$

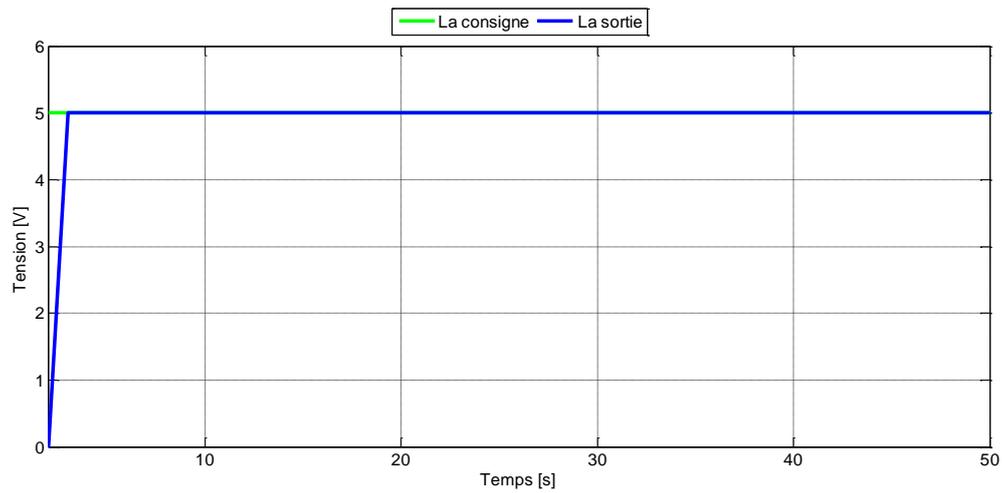
Pour calculer la sortie du système ainsi la commande nous exploitons les équations (II.14) et (II.20) :

$$y_M(k+H) = \alpha^H y_M(k) + K_M(1 - \alpha^H)u(k)$$

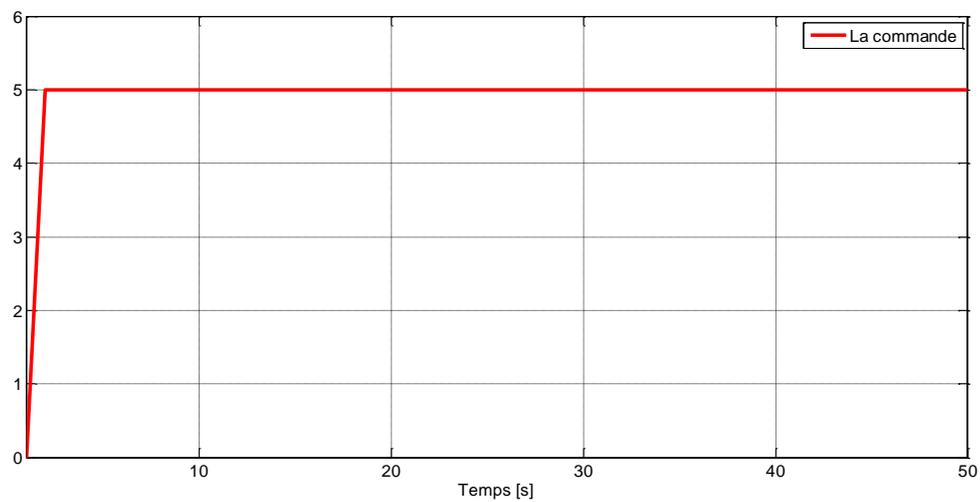
$$u = \frac{(1 - \lambda^H)(C(k) - y_p(k))}{(1 - \alpha^H)k_M} + \frac{y_M}{k_M}$$

Les paramètres du régulateur PFC:  $F_{accel} = 1$ ;  $T_{Bf} = 0.0015s$ ;  $H = 1$

Après avoir simulé le système nous avons obtenu les figures (II.7) et (II.8) :



**Figure II.7 :** L'allure de la sortie du système



**Figure II.8 :** L'allure de la commande

## II.12 Simulation d'un système de 3<sup>ème</sup> ordre

Soit un système de troisième ordre décrit par [26] :  $H(p) = \frac{2}{24p^3 + 26p^2 + 9p + 1}$

Les valeurs des paramètres de ce système:

- $\tau = 20s$ ;       $T_e = 2.5s$
- $T_{Bo} = 60s$ ;       $F_{accel} = 2$
- $H = 2s$ ;       $T_{Bf} = 30s$

Nous avons décomposé le système en trois sous systèmes de premier ordre.

Pour la décomposition, on développe le processus en élément simples d'où la fonction de transfert  $H(p)$  devient :

$$H(p) = \left( \frac{k_1}{1+\tau_1 p} + \frac{k_2}{1+\tau_2 p} + \frac{k_3}{1+\tau_3 p} \right)$$

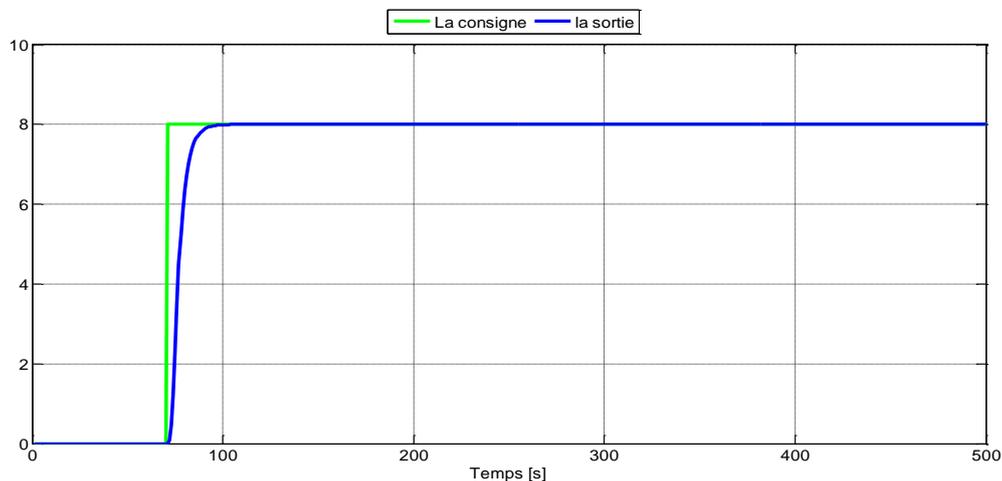
$$H(p) = \left( \frac{4}{1+2p} - \frac{18}{1+3p} + \frac{16}{1+4p} \right)$$

La loi de commande à appliquer est celle de l'équation (II.33) :

$$u = \frac{(1 - \lambda^H)(C(k) - y_p(k))}{\sum_{i=1}^m k_i (1 - a_i^H)} + \frac{\sum_{i=1}^m y_i(k)(1 - a_i^H)}{\sum_{i=1}^m k_i (1 - a_i^H)}$$

Après simulation du système on a obtenu les figures suivantes :

▪ **Cas 1 : sans perturbation**



**Figure II.9 :** l'allure de la sortie du système

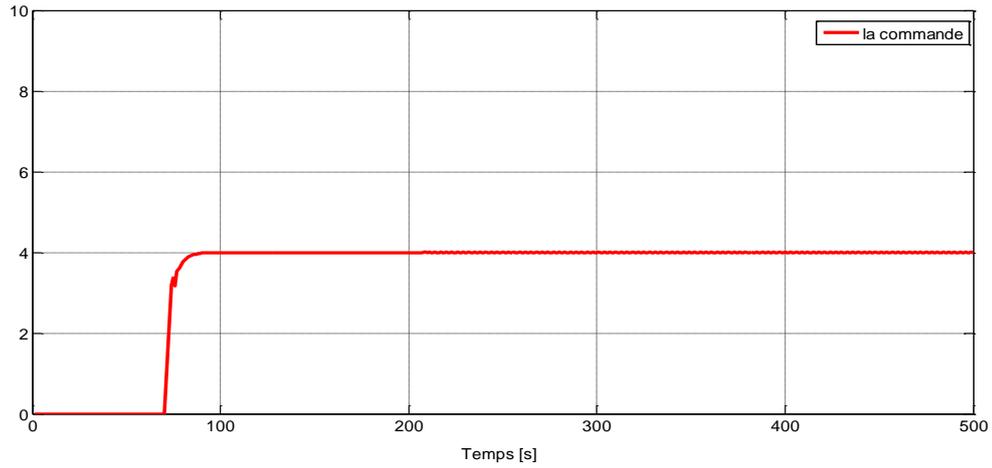


Figure II.10: l'allure de signal de commande

- Cas 2: avec une perturbation à l'instant  $t=150s$

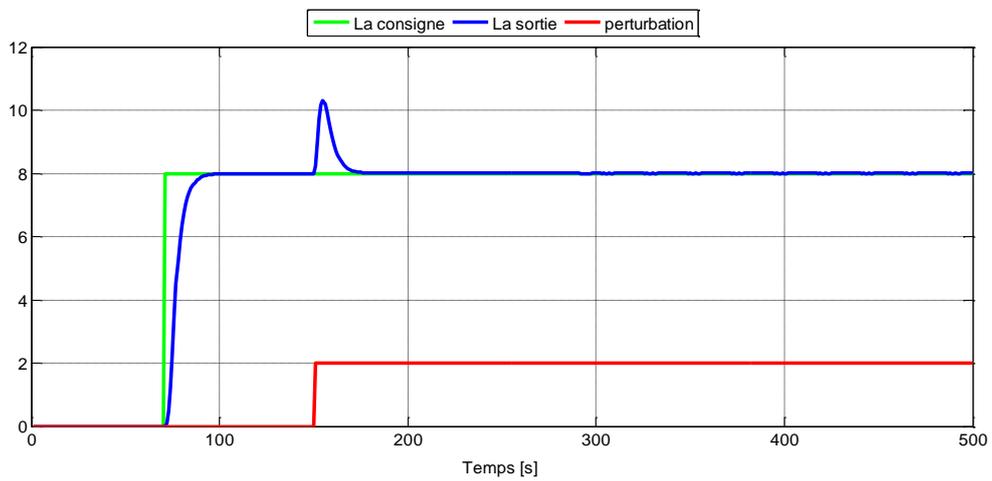


Figure II.11: La sortie du système avec perturbation

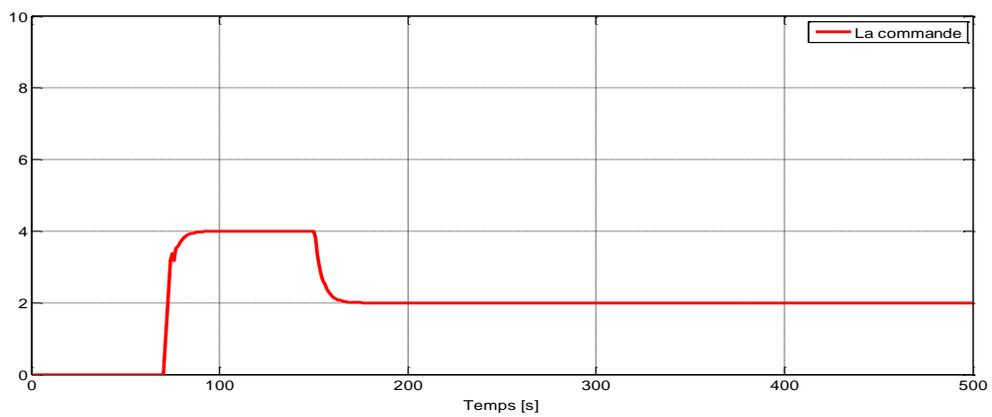


Figure II.12 : La commande du système avec perturbation

## Interprétation des résultats

La figure (II.7) montre la réponse du système de premier ordre (circuit RC) à une consigne constante de 5V, on observe bien que la sortie atteint rapidement la consigne, et qu'elle a le même comportement que le signal de commande présenté dans la figure (II.8) .

Les figures ( II.9), ( II.10) représentent respectivement la sortie prédite et la commande du système de 3<sup>ème</sup> ordre à une consigne d'amplitude 8 ;on remarque que la sortie du système suit parfaitement sa consigne.

Et pour le signal de commande, on constate qu'il est stable à une valeur d'amplitude 4.

Les figures (II.11), (II.12) resprésentent la sortie et la commande du système dans le cas avec une perturbation égale à 2 rajoutée à  $t= 150s$ , on voit que l'amplitude de la sortie revient rapidement de nouveau vers la consigne à  $t= 170s$ , et la commande chute d'amplitude 2 et se stabilise à  $t=160s$ .

## II.13 Conclusion

Dans ce chapitre, on a consacré notre étude sur la commande prédictive, plus précisément, nous nous sommes intéressés à la technique PFC ainsi ces quatre principes de base, ensuite l'obtention de la loi de commande.

Enfin, Pour valider ces performances, PFC a été appliquée respectivement sur des systèmes linéaires mono variables de 1<sup>er</sup> ordre (circuit RC), 3<sup>ème</sup> ordre ; les résultats de simulation montrent que le régulateur PFC a un bon suivie de la trajectoire et peut commander des processus d'ordre quelconque.

## CHAPITRE III

Application de la commande  
prédictive fonctionnelle pour  
la régulation thermique de la  
température ambiante dans un  
bâtiment

## CHAPITRE III: Application de la PFC pour la régulation thermique de la température ambiante dans un bâtiment

### III.1 Introduction

Dans ce chapitre, on se propose d'appliquer l'algorithme de la commande PFC élaboré dans le chapitre précédent à notre processus chauffage bâtiment, en exploitant un modèle identifié qui représente le comportement du système.

Pour ce faire, nous allons suivre une démarche qui va nous permettre de calculer la loi de commande équivalente à fournir au système afin de répondre à l'objectif d'optimisation qui est alors l'amélioration du confort et la minimisation de la consommation d'énergie.

### III.2 Les paramètres du système utilisés

Les différents paramètres utilisés sont illustrés dans le tableau ci-dessous.

**Tableau III-1:** Paramètres du système

Entrées	Valeurs
$E_{\text{vert}}$ [W/m <sup>2</sup> ], $E_{\text{vert}}$ [lux]	Connectées à la météo
Blind_pos	1 (ouvert la journée)
$T_{\text{ext}}$ [°C]	La température extérieure.
$T_{\text{upper}}$ [°C]	La température résultante de la zone adjacente en contact avec le plafond.
$T_{\text{lower}}$ [°C]	La température résultante de la zone adjacente en contact avec le plancher.
$T_{\text{adj}}$ [°C]	La température résultante de la zone adjacente en contact avec le mur.
$Q_{\text{elec}}$ [W]	Gain de chaleur des équipements électriques
$Q_{\text{occ}}$ [W]	Gain de chaleur des occupants
Air <sub>in</sub>	Connecté à la météo (variable)
Saturation	[0.5 1]

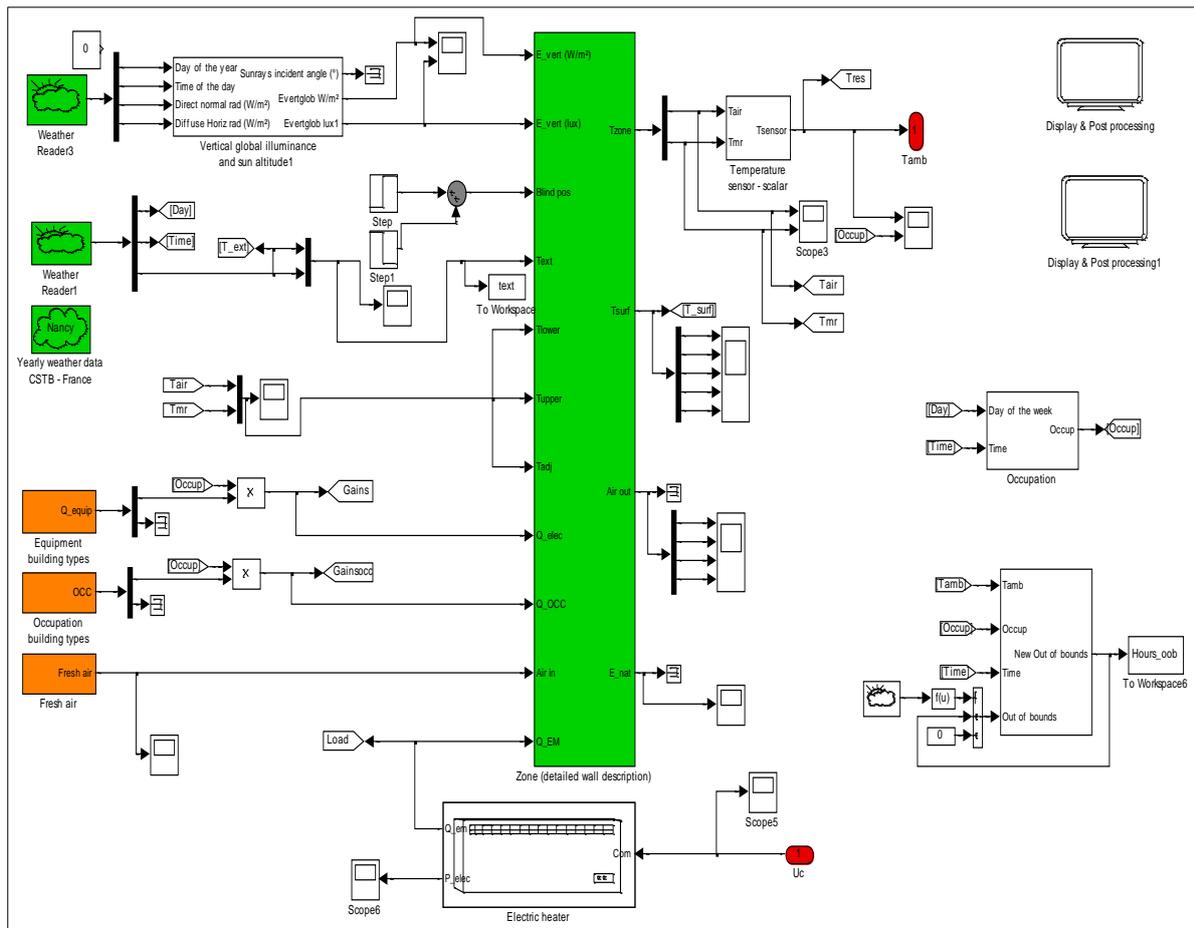


Figure III.1: Chauffage d’une pièce avec des entrées reliées à la météo

### III.3 Identification du système chauffage bâtiment

L’identification d’un système est la partie la plus difficile pour la mise en œuvre d’une commande prédictive, spécifiquement le système chauffage qui se définit comme un système non linéaire et aussi en raison de sa lenteur.

Pour cela, on a pris un modèle linéaire qui représente parfaitement le comportement du système chauffage, qui sera utilisé dans ce qui suit pour l’application de la commande PFC.

Le modèle linéaire qui identifie notre système est celui d’un troisième ordre défini par la fonction de transfert en continu suivante [27] :

$$G(p) = \frac{K(T_z + 1)}{p(T_w^2 p + 2\varepsilon T_w + 1)} \tag{III.1}$$

Avec :  $K = 0.000226$ ;  $T_z = 61741$ ;  $T_w = 834$ ;  $\varepsilon = 1.1606$

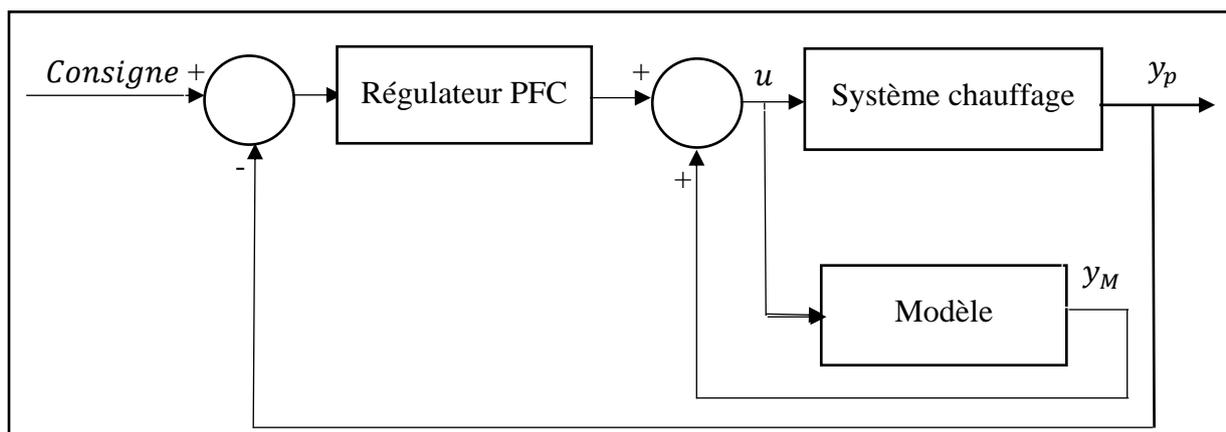
### III.4 Application de la commande PFC

Rappelant le but de la commande qui est de réguler la température ambiante de la pièce à la valeur de température souhaitée, et de satisfaire le compromis entre le confort et la consommation.

On définit quelques paramètres qui seront utilisés par la suite dans l'application, ainsi le schéma qui correspond à celle-ci.

**Tableau III-2:** Représentation des paramètres prises pour la simulation

Donnée météorologique	Rennes, France
Nombre d'occupant	2 personnes
Temps de simulation	24 h
Période d'occupation	8h00 : 17h00



**Figure III.2:** Schéma bloc de la commande PFC

#### III.4.1 Algorithme de calcul de la commande

La loi de commande du PFC est donnée par les étapes suivantes :

##### Etape 1 : Formulation du modèle interne

- **La décomposition du modèle**

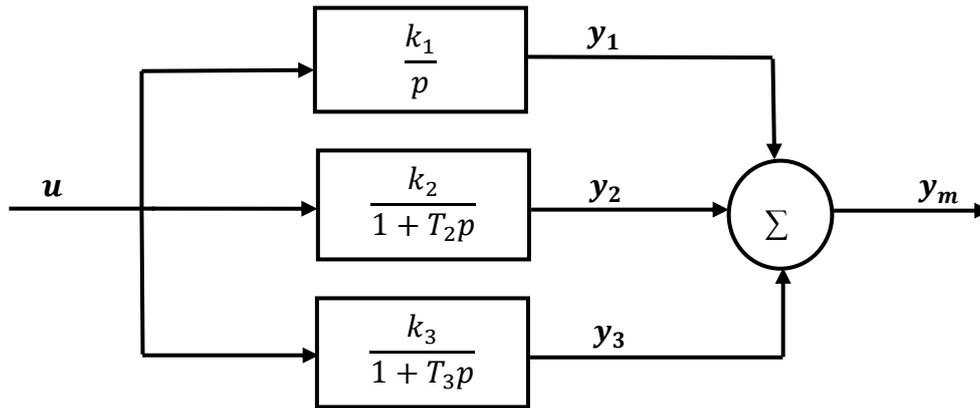
En utilisant comme modèle interne l'équation (III.1), dont on va effectuer la décomposition en éléments simples de trois sous modèles  $M_1$ ,  $M_2$  et  $M_3$ .

$$G(p) = \frac{k_1}{p} + \frac{k_2}{1 + T_2 p} + \frac{k_3}{1 + T_3 p} \quad (\text{III. 2})$$

Les paramètres du modèle :

$$\begin{cases} k_1 = 2.26 * 10^{-4} \\ k_2 = -6.9286 \\ k_3 = 20.4403 \end{cases} \quad \begin{cases} T_1 = 1 \\ T_2 = 476.1906 \\ T_3 = 1428.600 \end{cases}$$

La figure ci-dessous montre la décomposition parallèle du modèle :



**Figure III.3:** Modèle interne parallèle

Comme le modèle comprend un intégrateur il convient de décomposer le terme intégrateur qui est instable en deux modèles  $M_{01}$  et  $M_{02}$  du premier ordre en parallèle [24].

Afin d'implémenter le modèle dans le calculateur de commande on doit transformer le modèle en discret; donc le modèle parallèle plus le BOZ avec une période d'échantillonnage  $t_e = 70s$  nous donne :

$$\begin{cases} M_{01}(z^{-1}) = \frac{K_1 z^{-1}}{1 - a_1 z^{-1}} \\ M_{02}(z^{-1}) = \frac{(1 - a_1) z^{-1}}{1 - a_1 z^{-1}} \\ M_2(z^{-1}) = \frac{K_2 (1 - a_2) z^{-1}}{1 - a_2 z^{-1}} \\ M_3(z^{-1}) = \frac{K_3 (1 - a_3) z^{-1}}{1 - a_3 z^{-1}} \end{cases}$$

Avec :  $a_1 = e^{-t_e/T_1}$  ;  $a_2 = e^{-t_e/T_2}$  ;  $a_3 = e^{-t_e/T_3}$

### ▪ La sortie du modèle

De la figure (III.3) la sortie globale du modèle  $y_M(k)$  est donnée par :

$$y_M(k) = y_{M1}(k) + y_{M2}(k) + y_{M3}(k) \quad (\text{III. 3})$$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} y_1(k) = a_1 y_1(k-1) + (k_1 + (1-a_1))(1-a_1)u(k-1) \\ y_2(k) = a_2 y_2(k-1) + k_2(1-a_2)u(k-1) \\ y_3(k) = a_3 y_3(k-1) + k_3(1-a_3)u(k-1) \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (\text{III. 4}) \\ (\text{III. 5}) \\ (\text{III. 6}) \end{array}$$

### Etape 2 : Formulation de la trajectoire de référence

$$y_R(k+H) = C - \lambda^H (C - y_p(k)) \quad (\text{III. 7})$$

$$\text{Avec :} \quad \lambda^H = e^{-T_e * H * 3 / T_{Bf}} \quad (\text{III. 8})$$

### Etape 3 : Calcul de la sortie prédite

La sortie estimée du modèle est donnée par :

$$y_p(k+H) = \sum_{i=1}^3 y_i(k+H) + (y_p(k) - \sum_{i=1}^3 y_i(k)) \quad (\text{III. 9})$$

### Etape 4: Calcul de la loi de commande

L'expression de la loi de commande est :

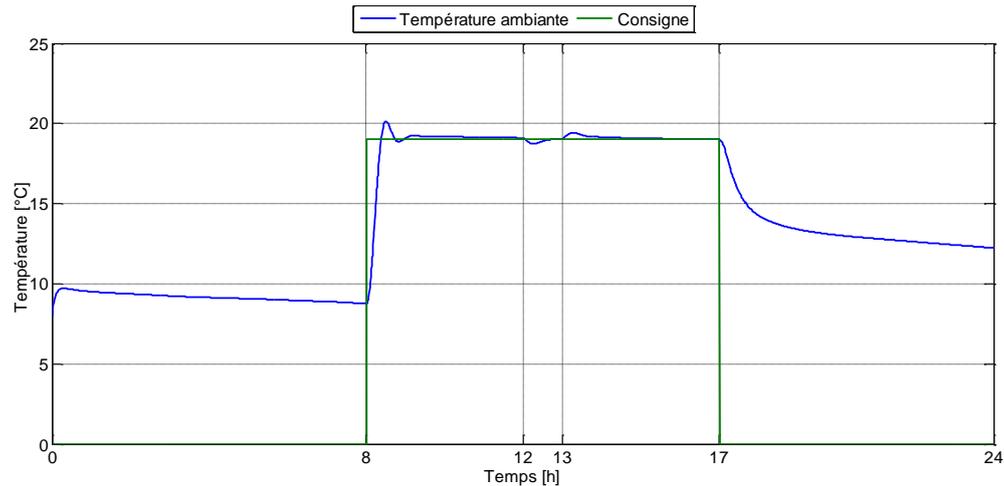
$$u = \frac{(1 - \lambda^H)(C(k) - y_p(k))}{\sum_{i=1}^3 k_i (1 - a_i^H)} + \frac{\sum_{i=1}^3 y_i(k)(1 - a_i^H)}{\sum_{i=1}^3 k_i (1 - a_i^H)} \quad (\text{III. 10})$$

### Paramètres du régulateur PFC

$$T_{Bf} = 4000s ; \quad T_e = 70 ; \quad F_{\text{accel}} = 2 ; \quad H = 10s$$

Le temps de réponse en boucle fermée est le paramètre majeur de réglage du PFC qui est fixé par la trajectoire de référence, et la dynamique du système dépend de ce dernier. Pour cela, on a testé différentes valeurs du  $T_{Bf}$ , de telle sorte que  $H$  serait court, ce qui a pour conséquence la commande qui va être très active et plus stable comparant à un  $H$  lointain, et on a pu constater que la valeur de  $T_{Bf} = 4000s$  assure un bon résultat pour la commande.

Les résultats de simulation sont donnés par la figure (III.4).



**Figure III.4:** Allure de la sortie du système et la consigne

### Interprétation des résultats

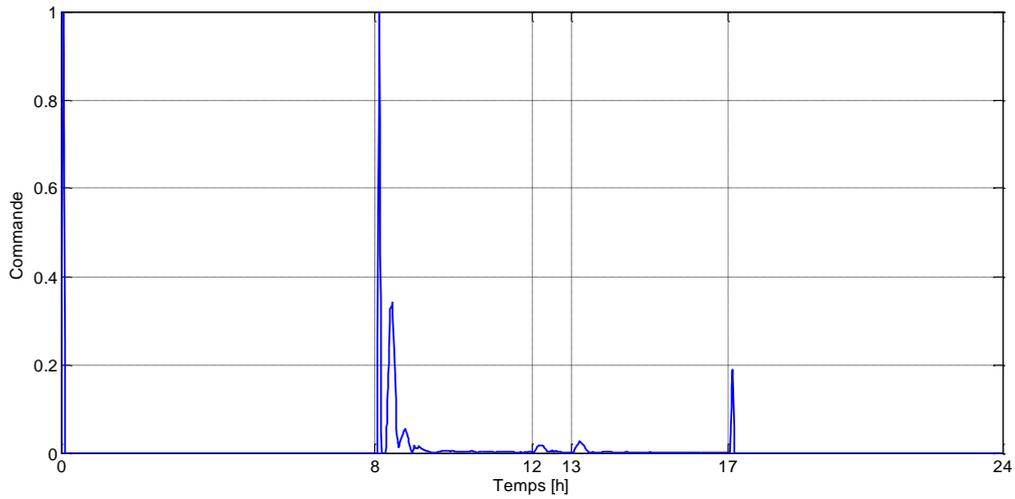
La figure (III.4) montre l'allure de la sortie du système qui représente la température ambiante de la pièce ; on constate qu'à 8h (début de la période d'occupation) elle atteint rapidement la température de référence qui est 19°C et reste stable durant toute la période d'occupation ; pour cela on conclut que le confort des occupants est maintenu.

### III.5 Représentation graphique des différents indices

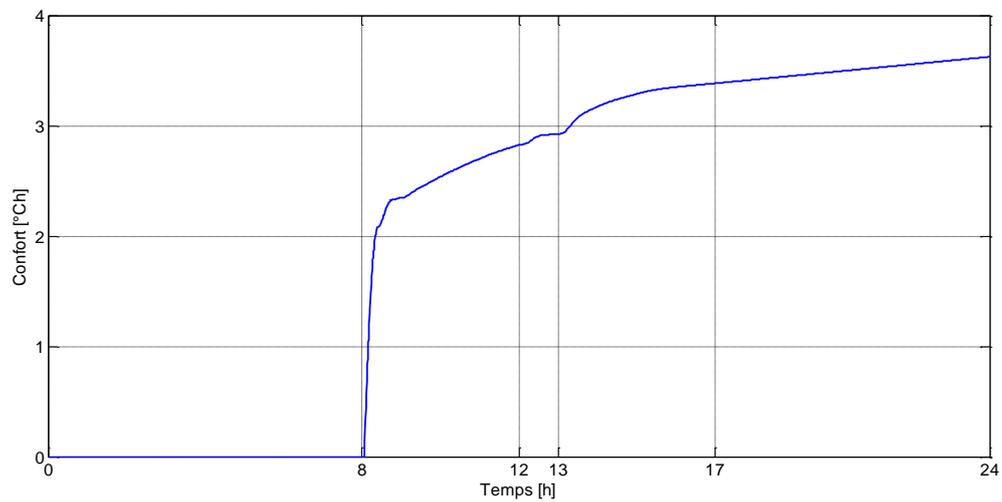
Comme ils sont définis, ce sont des indices qui nous informent sur la consommation d'énergie, le confort et la stabilité de la commande appliquée. Ils sont obtenus à partir de:

- ❖ la puissance électrique consommée par le radiateur pendant la journée; on l'a calculée à partir du signal de sortie du radiateur ; (la consommation)
- ❖ l'erreur entre le signal désiré (19°C) pendant la période d'occupation et la sortie système ; (le confort).
- ❖ la différence entre deux valeurs consécutives du signal de commande appliquée ; (la stabilité de la commande).

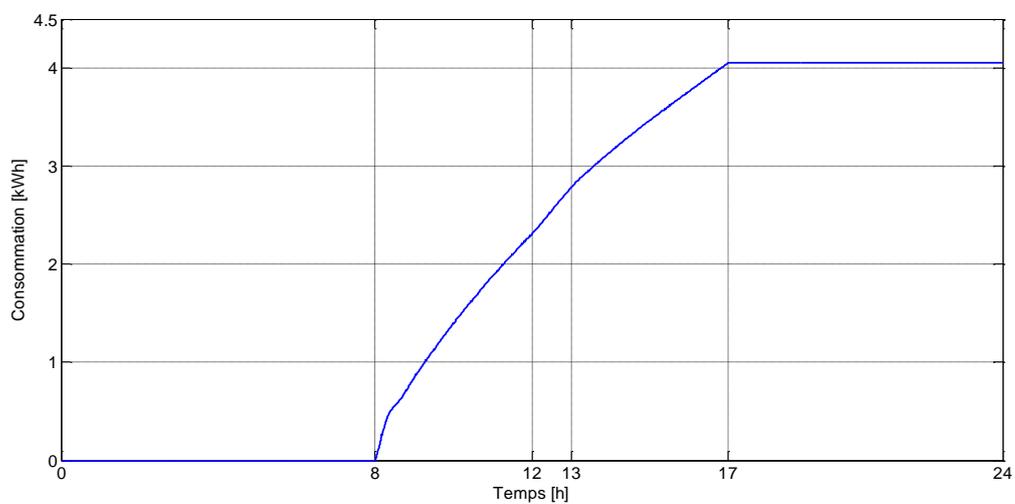
Les différents indices sont donnés par les figures (III.5, III.6 et III.7).



**Figure III.5:** Représentation graphique de l'indice de stabilité de la commande



**Figure III.6:** Représentation graphique de l'indice de confort



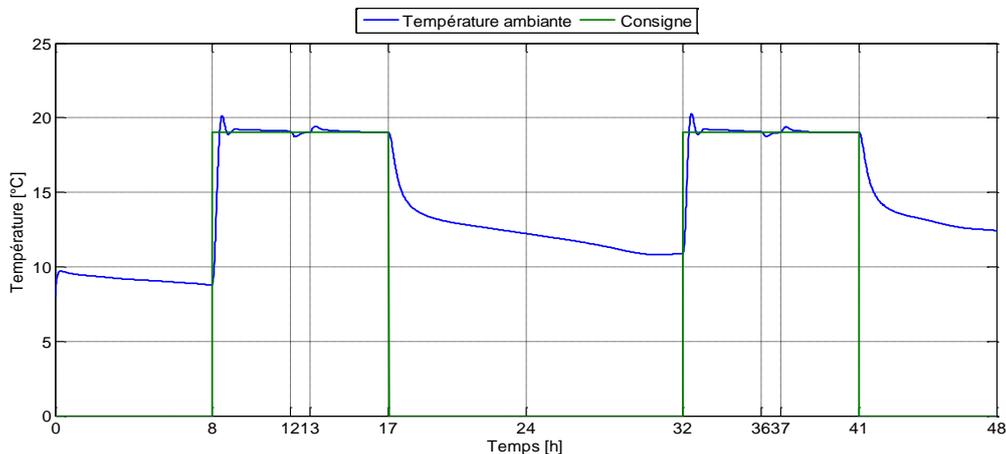
**Figure III.7:** Représentation graphique de l'indice de consommation

## Interprétation des résultats

Les figures (III.6) et (III.7) montrent respectivement la représentation graphique des indices de confort ainsi de la consommation, on remarque qu'au début de la période d'occupation, les valeurs de ces indices augmentent car le chauffage est activé puis ils se stabilisent à une valeur fixe. On peut conclure qu'avec une consommation minimale qui est égale à 4kWh, on a garanti un bon confort.

Et d'après la figure (III.5) on voit bien que la commande présente des faibles oscillations seulement au début de la période d'occupation (8h) pour cela, on déduit que la commande est stable.

## Simulation pour deux jours



**Figure III.8:** Allure de la sortie du système et la consigne pour deux jours

## Interprétation des résultats

D'après la figure de la simulation pour deux jours, on constate que la sortie du système (la température interne de la pièce) suit parfaitement la consigne (la température désirée) et reste au voisinage de celle-ci pendant la période d'occupation.

## III.6 Étude de la robustesse de la commande PFC

Dans le but d'étudier la robustesse de la commande prédictive fonctionnelle, nous allons analyser les cas suivants :

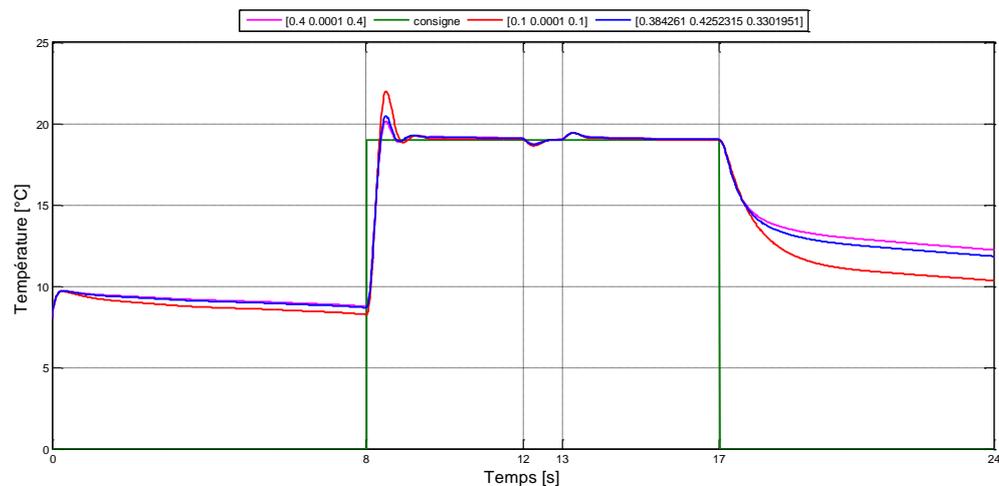
- Changement des coefficients de transmission.
- Changement de la température initiale.
- Variation des dimensions de la pièce.
- Variation de la saturation.

## A. Changement des coefficients de transmission

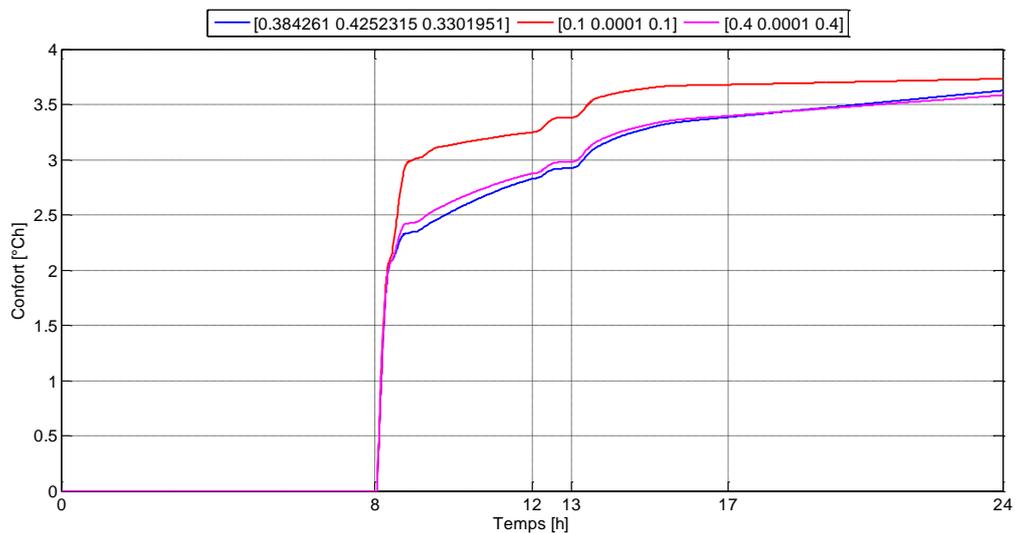
Nous allons effectuer des changements sur les coefficients de transmission, en gardant les autres paramètres constants, dont on va étudier trois cas.

- 1<sup>er</sup> cas : [0.384261 0.4252315 0.3301951]
- 2<sup>ème</sup> cas: [0.1 0.0001 0.1]
- 3<sup>ème</sup> cas:[0.4 0.0001 0.4]

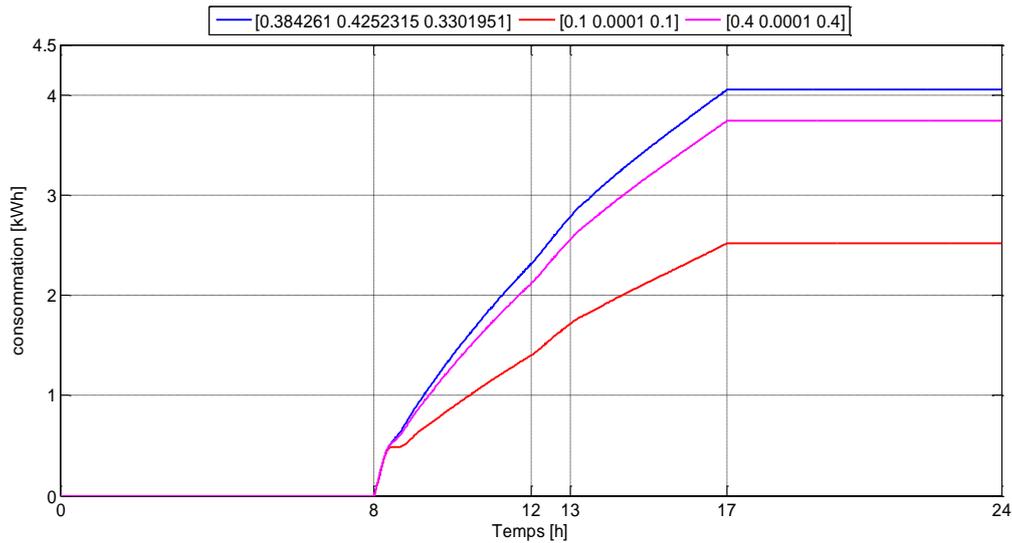
Les figures ci-dessous montrent les résultats de simulation :



**Figure III.9:** Allures de la température ambiante de la pièce et la consigne pour les trois cas



**Figure III.10:** Allures des indices de confort pour les trois cas



**Figure III.11:** Allures des indices de consommation pour les trois cas

### Interprétation des résultats

✓ D'après la figures (III.9):

On remarque que les coefficients de transmission influent sur le temps de réponse. Le système atteint rapidement la température de référence pour des coefficients de transmission faibles, cela est dû au faible échange thermique entre la pièce et le milieu extérieur. Et un temps de réponse du système plus élevé pour des coefficients de transmission importants.

✓ D'après les figures ( III.10) (III.11):

on constate que l'isolation (l'échange thermique avec le milieu extérieur) influe proportionnellement sur le confort des occupants ainsi la consommation d'énergie, et ceci s'explique par :

lorsque on a des coefficients de transmission faibles (2<sup>ème</sup> cas) on a un bon confort (3.9°C.h) avec une faible consommation d'énergie (2.5kWh), en revanche si on augmente les valeurs des coefficients de transmission on a un meilleur confort de (3.8°C.h) mais avec une croissance de la consommation (3.7kWh).

On conclut qu'une bonne isolation implique un bon compromis entre le confort et la consommation d'énergie.

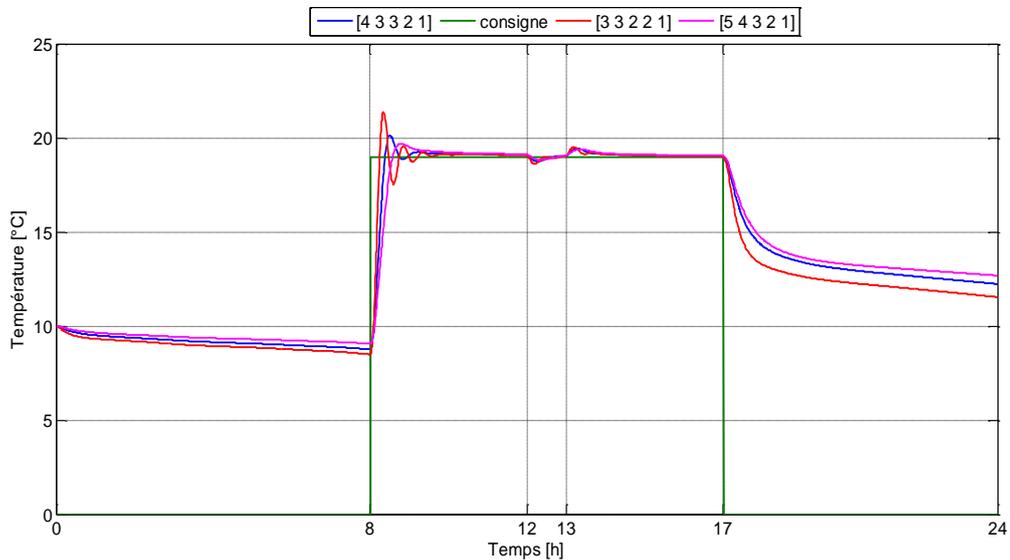
## B. Variation des dimensions de la pièce

Dans le but de voir l'influence de la géométrie de la pièce traitée sur la température ambiante, on a fixé tous ces paramètres et on a varié sa dimension en considérant un vecteur composé de longueur, largeur et hauteur de la pièce, longueur et largeur de la fenêtre .

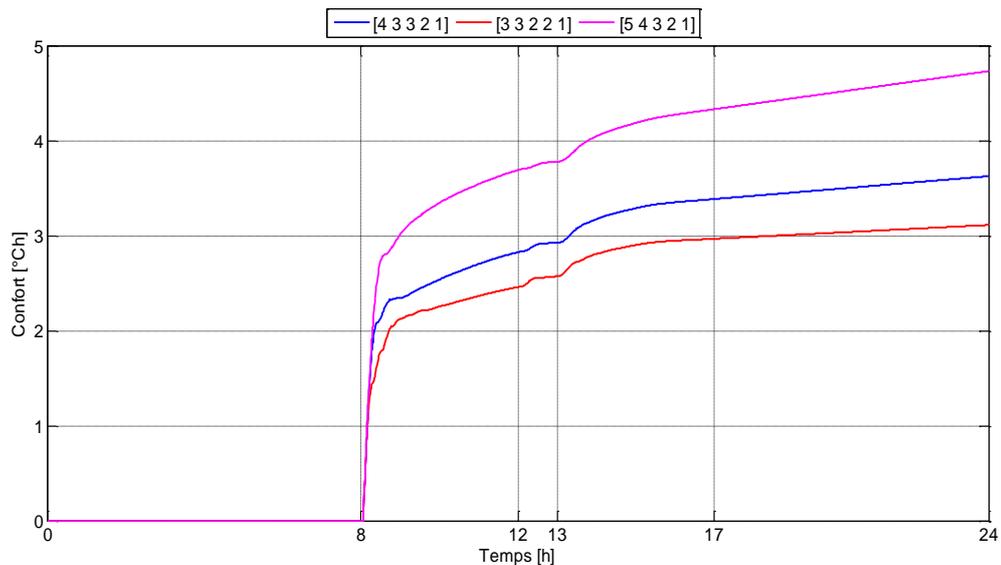
Pour cela on va étudier trois cas:

- 1<sup>er</sup> cas: [4 3 3 2 1]
- 2<sup>ème</sup> cas: [3 3 2 2 1]
- 3<sup>ème</sup> cas: [5 4 3 2 1]

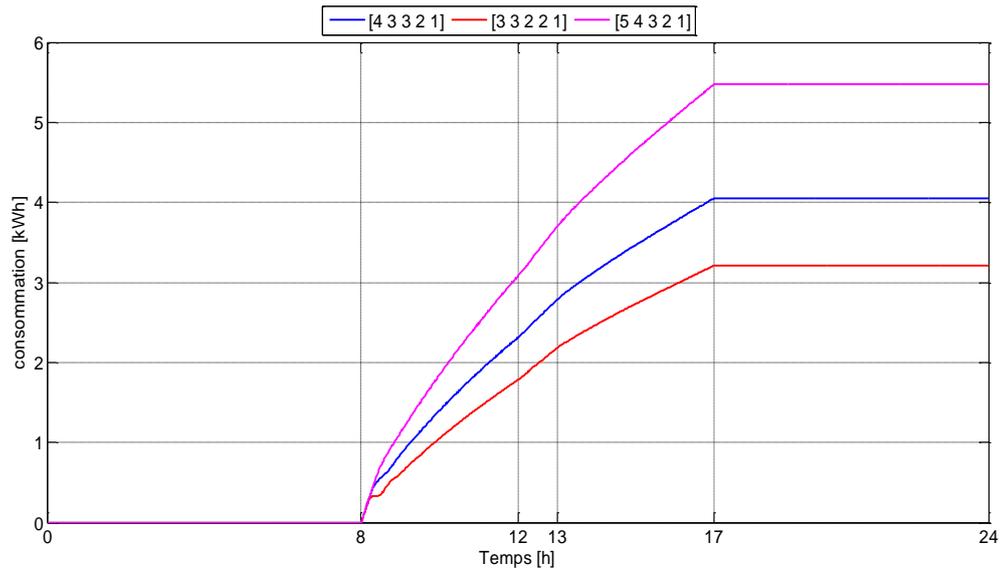
Les figures ci-dessous montrent les résultats de simulation :



**Figure III.12:** Allures de la température ambiante de la pièce et la consigne pour les trois cas



**Figure III.13:** Allures des indices de confort pour les trois cas



**Figure III.14:** Allures des indices de consommation pour les trois cas

### Interprétation des résultats

✓ D'après la figure (III.12):

On remarque une influence de la géométrie sur la température ambiante. Plus on augmente la dimension de la pièce plus on a un temps de réponse du système élevé et quand on diminue les dimensions, le système atteint rapidement la température de référence (19°C).

✓ D'après les figures (III.13) et (III.14):

On constate que : lorsqu'on augmente les dimensions de la pièce, la consommation d'énergie augmente en assurant un confort considérable. Alors on déduit que pour des petites dimensions on a un meilleur confort et une consommation d'énergie réduite.

### C. Saturation

Afin de voir l'influence de la saturation sur la sortie du système, on va étudié trois cas.

- 1<sup>er</sup> cas: 1
- 2<sup>ème</sup> cas : 0.5
- 3<sup>ème</sup> cas :0.8

Les figures ci-dessous montrent les résultats de simulation :

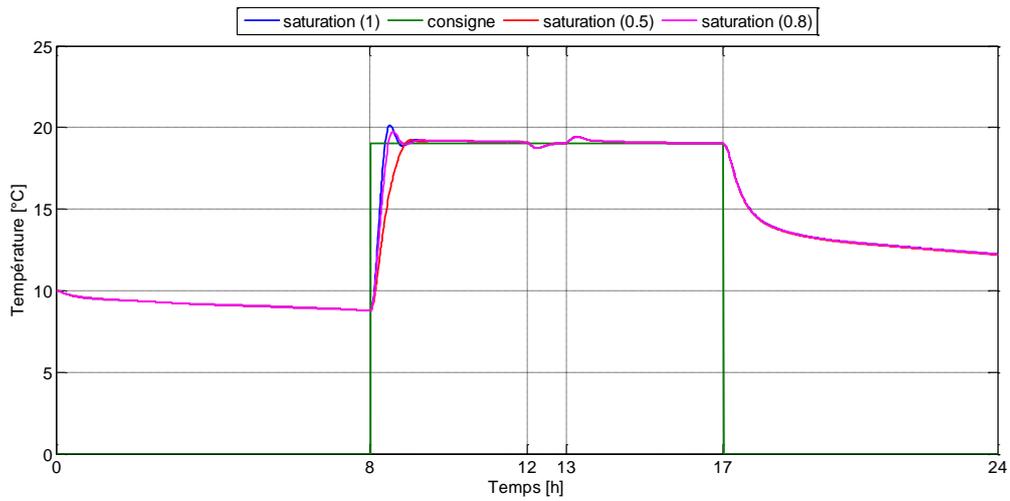


Figure III.15: Allures de la température ambiante de la pièce et la consigne pour les trois cas

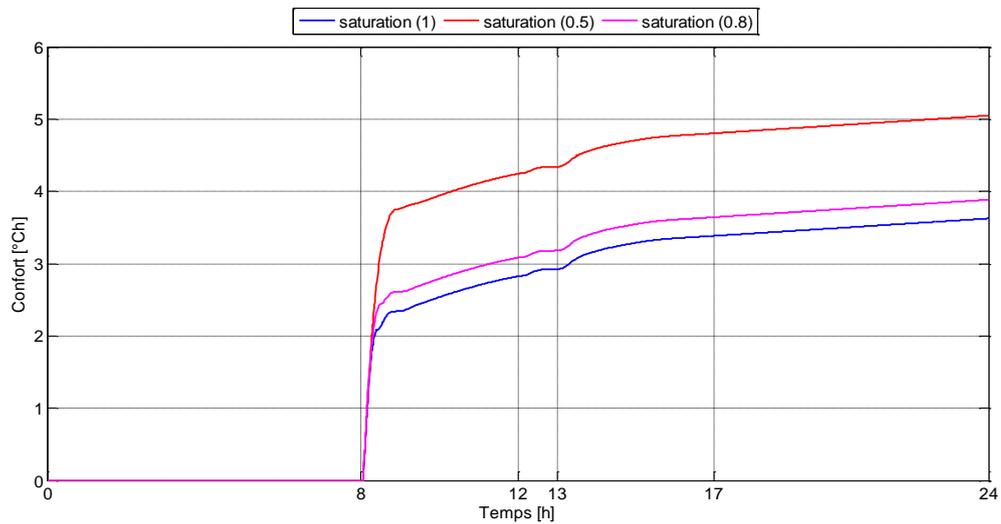


Figure III.16: Allures des indices de confort pour les trois cas.

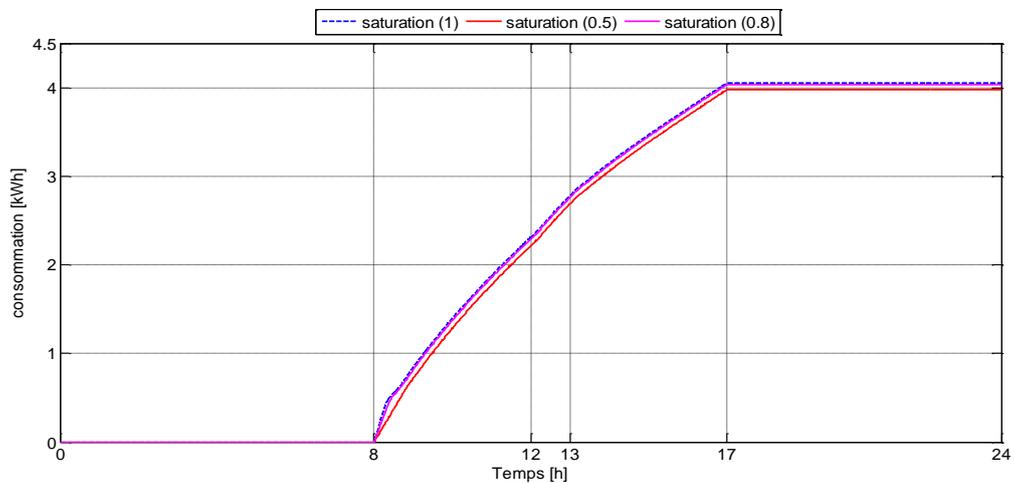


Figure III.17: Allures des indices de consommation pour les trois cas.

## Interprétation des résultats

✓ D'après les figures (III.15):

On voit bien que pour une faible saturation (0.5) le temps de réponse du système est un peu lent et qu'on augmente la saturation à une valeur 0.8, le système répond rapidement par rapport au deuxième cas. Enfin, pour une valeur égale à 1 le système suit parfaitement la consigne (température désirée) avec un temps de réponse plus petit.

✓ D'après les figures (III.16) et (III.17) :

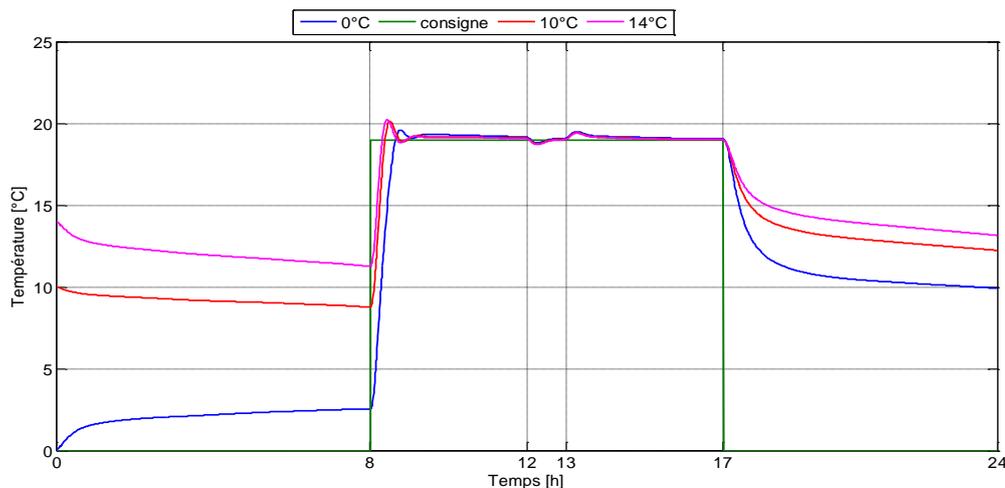
On constate que lorsqu'on a une faible saturation (2<sup>ème</sup> cas) on a un confort de 5.05°C.h avec une consommation d'énergie de 4.05kWh, et quand on augmente la saturation à la valeur 1 on a pu voir un meilleur confort (3.75°C.h) et une consommation d'énergie considérable (4.05kWh).

On conclut que la saturation influe sur la réponse du système, et une saturation de (1) assure un meilleur confort pour les occupants.

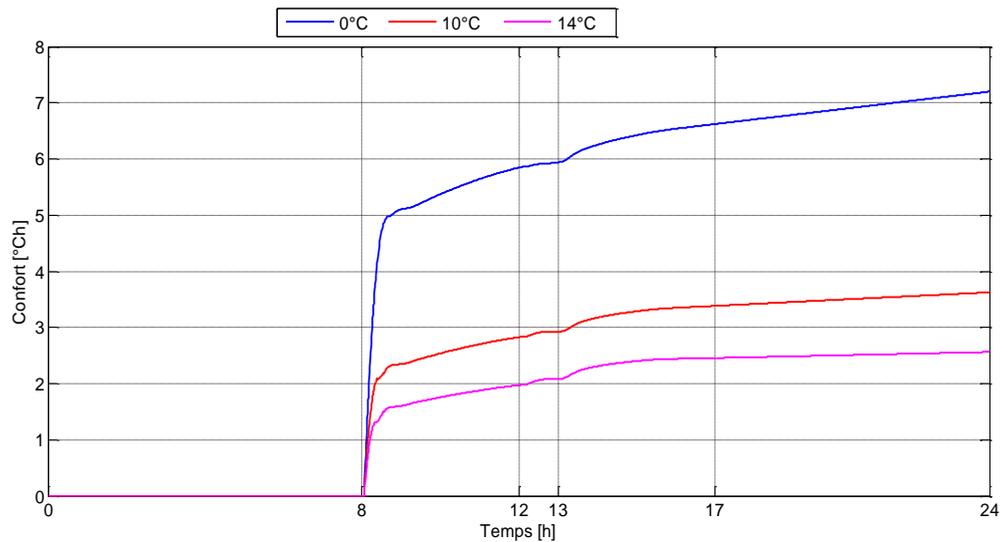
### D. Température initiale

- 1<sup>er</sup> cas : 0°C
- 2<sup>ème</sup> cas : 10°C
- 2<sup>ème</sup> cas : 14°C

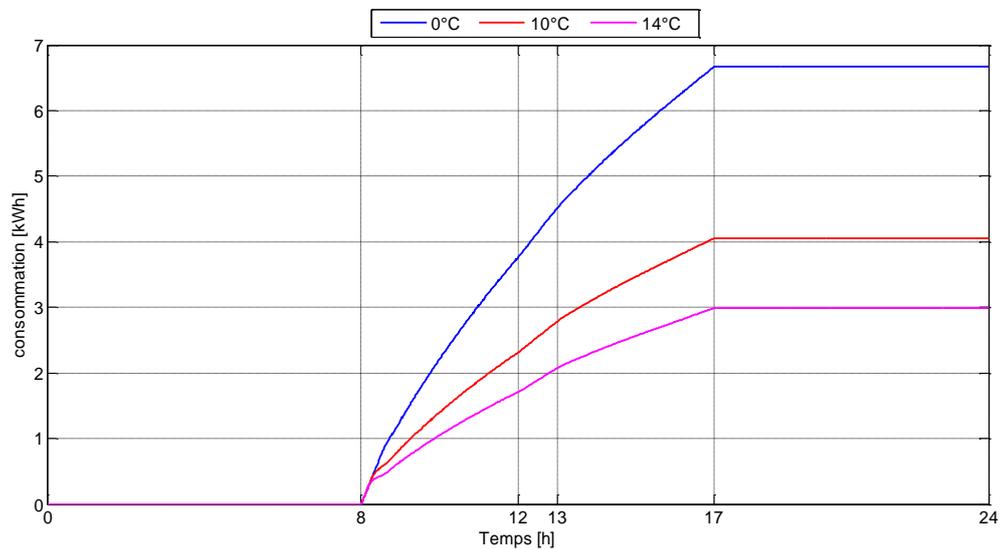
Les figures ci-dessous montrent les résultats de simulation :



**Figure III.18:** Allures de la température ambiante de la pièce et la consigne pour les trois cas



**Figure III.19:** Allures des indices de confort pour les trois cas



**Figure III.20:** Allures des indices de consommation pour les trois cas

### Interprétation des résultats

✓ D'après les figures (III.18) :

On a pour une température initiale égale à 0°C, la réponse du système est un peu lente et cela est dû à l'inertie de la pièce et quand on augmente à une valeur de 10°C, le temps de réponse est réduit par rapport au 1<sup>er</sup> cas; et pour une température initiale égale à 14°C qui est proche de la température désirée (19°C) on a un temps de réponse plus petit.

On déduit que La température initiale de la pièce influe sur la réponse du système, et que l'augmentation de celle-ci engendre un temps de réponse plus faible.

✓ D'après les figures (III.19) et (III.20) :

Pour une température initiale égale à  $0^{\circ}\text{C}$ , on a un confort de  $7.1^{\circ}\text{Ch}$  avec une consommation d'énergie de  $6.85\text{kWh}$ , et lorsqu'on augmente sa valeur à  $10^{\circ}\text{C}$  on a un bon confort ( $3.7^{\circ}\text{Ch}$ ), et une consommation diminuée; et pour une température de  $14^{\circ}\text{C}$  on a un très bon confort d'une valeur de  $2.6^{\circ}\text{Ch}$  et une consommation minimale ( $3\text{kWh}$ ).

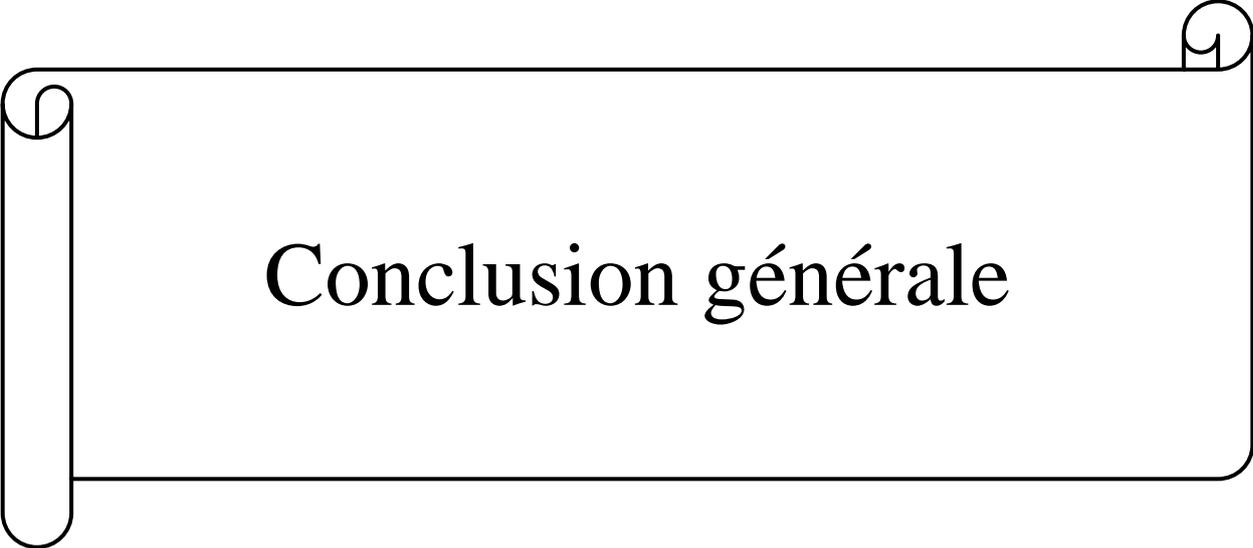
On constate qu'à chaque fois qu'on augmente la température initiale, on assure un bon confort et une consommation réduite.

### **III.7 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons abordé en premier lieu l'algorithme de la commande PFC qui nous a permis par la suite son application à notre système chauffage bâtiment et cela en utilisant un modèle linéaire qui représente ce système.

Les résultats de simulation de la commande ont bien montré les performances de celle-ci pour la régulation de la température interne de la pièce et la satisfaction du confort des occupants.

La commande PFC est un algorithme simple utilisé largement dans la commande des processus industriels et robustes, et a un bon comportement vis-à-vis les perturbations.



Conclusion générale

## Conclusion générale

L'objectif principal de ce travail consiste à la régulation thermique de la température ambiante d'une pièce à la valeur de la température désirée (19°C) pendant les périodes d'occupation, cet objectif s'exprime sous forme d'un problème d'optimisation: maintenir un certain niveau de confort en minimisant la consommation d'énergie. L'utilisation d'une commande avancée de type PFC a montré son efficacité de réguler la température ambiante du chauffage bâtiment.

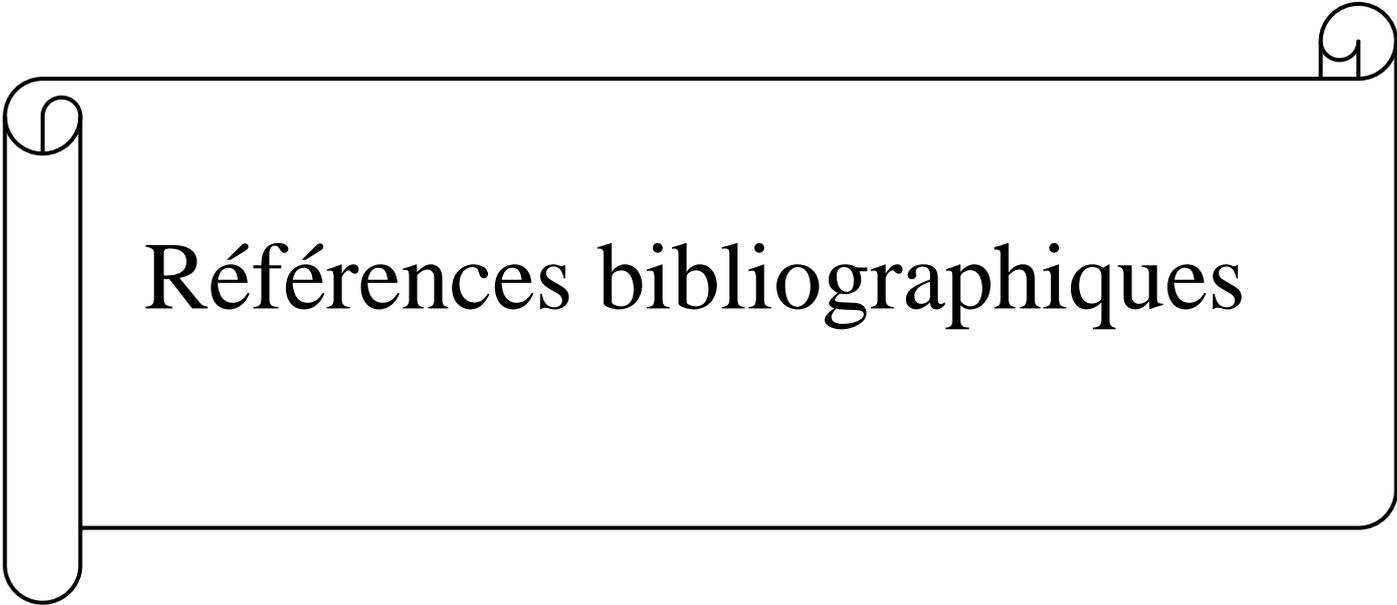
Avant d'entamer l'étude de la commande, nous avons réalisé dans le premier chapitre la simulation en boucle ouverte du système chauffage bâtiment, qui nous a permis de constater que la température ambiante de la pièce dépend de plusieurs paramètres géométriques, climatiques et énergétiques.

En effet, l'une des raisons pour laquelle nous avons opté pour l'utilisation de la commande prédictive est sa facilité d'implantation et sa simplicité pour la mise en œuvre. Dans le deuxième chapitre, la méthode prédictive fonctionnelle a été proposée afin de répondre à l'objectif cité. Cette commande repose sur quatre principes qui sont détaillés tout au long du chapitre et qui ont permis par la suite l'élaboration de la loi de commande. Afin de valider notre approche des exemples ont été traités.

Notre travail avait pour but d'appliquer la commande PFC sur le chauffage bâtiment pour réguler la température de la pièce tout en respectant le compromis entre le confort et la consommation. Cependant la commande nécessite l'exploitation d'un modèle interne pour réaliser une prédiction du comportement du système; pour ce faire nous avons adopté un modèle de troisième ordre qui représente le système. Les résultats des simulations ont montré que l'utilisation de la PFC contribue à une meilleure performance et garantit une robustesse face aux perturbations.

Comme perspective nous envisageons par la suite de notre étude :

- L'extension de la commande prédictive fonctionnelle à un modèle du bâtiment multizones pour arriver à gérer mieux plusieurs pièces.
- Utilisation de la commande à base des réseaux de communications (network control).
- Utilisation de la commande intelligente.



# Références bibliographiques

## Bibliographie

- [1] Luis Pérez-Lombard, José Ortiz, Christine Pout. «A review on buildings energy consumption information, Energy and buildings.»:394-398, 2008
- [2] F. BOUDALI ERREBAI, L. DERRADJI, Y. MAOUDJ, M. AMARA, A. MOKHTARI., *Confort thermique d'un local d'habitation : Simulation thermoaéraulique pour différents systèmes de chauffage.* e: Centre national d'études et de recherches Intégrées du batiments CNERIB, Oran, Algerie, 2012.
- [3] <http://www.ademe.fr/en/particuliers-eco-citoyens/dossierscomprendre/dossier/ l'energie-france/consomme-plus-denergie-France>.
- [4] Petru-Daniel, Morosan. «Commande prédictive distribuée. Approches appliquées à la regulatin termique des batiments.» Dans *Thèse de Doctrat.* supélec, France, 2011.
- [5] Thierry GALLAUZIAUX, David FEDULLO. *Le chauffage électrique et l'isolation thermique et le chauffage électrique.* EYROLLES, France, 2009.
- [6] RAZIKA KHARCHI. «Etude energetique de chauffage, rafraichissement et eau chaude sanitaire d'une maison type en algerie.» Dans *thèse de doctorat.* Tlemcen, Algerie, 2013.
- [7] BERKOUK, Djihed. «Évaluation du confort thermique et lumineux dans le logement collectif : Étude comparative entre le social et le promotionnel.» Biskra, Algerie, 2017.
- [8] BEKKOUCHE Sidi Mohammed El, Amine. «Modélisation du Comportement Thermique de Quelques Dispositifs Solaires.» Tlemcen, Algerie, 2009.
- [9] Maxime, ROBILLART. «Étude de stratégies de gestion en temps réel pour des bâtiments énergétiquement performants.» Dans *thèse de Doctorat Paris Tech.* France, 2015.
- [10] s.d. site internet : <https://conseils-thermiques.org/contenu/confort-thermique.php>.
- [11] A. Husaundee, D. Jrejjiry, J.R. Millet, J.G. Villenave, J.C. Visier. «Developing virtual laboratories for the design and test of ventilation control strategies», 2003.
- [12] Fadi, CHLELA,. «Développement d'une méthodologie de conception de bâtiments à basse.» *Thèse de doctorat.* Ecole doctorale de La Rochelle, France 2008.
- [13] Nazila Kahina, HANNACHI-BELKADI, «Développement d'une méthodologie d'assistance au commissionnement des bâtiments à faible consommation d'énergie.» Université Paris Est, thèse de doctora, Paris, France, 2008.
- [14] Ghizlane, HAFIDI. «Application de la commande prédictive non-linéaire à la commande de culture de bactéries Escherichia coli» Ecole Doctorale « Sciences et Technologies de l'Information des Télécommunications et des Systèmes, Paris,France, 28 septembre.
- [15] F. Barata, R. Silva. « Distributed Model Predictive Control for Housing with Hourly Auction of Available Energy.» 25 juillet 2016.

- [16] Lakhdar, Djaghdali. « Commande prédictive directe du couple de la machine asynchrone» thèse de doctorat, Université Mohamed Khider Biskra, Algerie, 2012.
- [17] P.Borne, G.Dauphin-Tanguy, J.P.Richard, F.Rotella, I.Zambettakis,. *Analyse et régulation des systèmes industriels*: Edition TECHNIP, Paris, France, 1993.
- [18] Joycelyn, Bouchard. « Commande prédictive basée sur la simulation Application a la flottation en colonne.» thèse de doctorat, Université Laval, Quebec, 2007.
- [19] Brahim, Tlili. « Identification et commande des systèmes non linéaires : utilisation des modèles de type NARMA.» thèse de doctorat, Ecole nationale d'ingénieurs de Tunis, 29 juillet 2008.
- [20] Alexandre, Teplaira Boum. «Commande prédictive d'un craqueur catalytique à lit fluidisé avec estmatin des paramètres clés.» Dans *thèse doctorat* université de lorraine, France, 2014.
- [21] L. Matoug, M.T. Khadir et M. Djeghaba,. «Modélisation et commande prédictive d'une station de production d'eau froide basée sur un compresseur scroll et des échangeurs à plaques brassées.» université badji mokhtar , Annaba, Algerie.
- [22] Matoug, Lamia. «Modélisation et commande prédictive d'une station de production d'eau glacée basée sur un compresseur scroll.» mémoire de magister, Université Badji Mokhtar- , Annaba, Algerie, 2008.
- [23] Sébastien, Cabaret. «Algorithmes de Contrôles Avancés pour les Installations à Gaz du LHC au CERN suivant le Framework et l'approche.» Dans *Thèse doctorat*. Jules verne, Université de Picardie France, Mars 2008.
- [24] Jacques, Richalet. *Pratique de la commande prédictive*,. Paris: éditions Hermès, 1993 .
- [25] Hossein FALLAHSOHI, Modélisation dynamique des échangeurs diphasiques, appliquée aux groupes frigorifiques contrôlés par une commande avancée, thèse doctorat Institut national des sciences appliquées de Lyon, France, 26 Avril 2011.
- [26] Ramdani, Ammar. *commande prédictive des systèmes dynamiques : étude comparative avec les régulateurs classiques*. mémoire de magister université M'hamed Bougara Bouverdes, Algerie, 2014.
- [27] Petru-Daniel Morosan, Romain Bourdais, Hevré Guéguen. «Apports de la commande prédictive pour la régulation thermique des bâtiments.» *Traitement de l'information et de l'environnement* : 479-492, 2010.