

**République Algérienne Démocratique et Populaire**

**Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique**



**Université Abderrahmane Mira**

**Faculté de la Technologie**



**Département d'Automatique, Télécommunication et d'Electronique**

## **Projet de Fin d'Etudes**

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Automatique

Spécialité : Automatique et informatique industrielle

### **Thème**

**Commande prédictive supervisée d'un système de chauffage, de ventilation et de climatisation**

**Préparé par :**

M<sup>r</sup> ATMANI Massinissa

M<sup>elle</sup> SELLAM Ferial

**Dirigé par :**

Dr A. OUARET

**Examiné par :**

Dr N. BELLAHSENE

Pr B. MENDIL

**Année universitaire : 2021/2022**

# Remerciements

*Nous tenons à remercier en tout premier lieu DIEU tout puissant de nous avoir accordé la santé, la volonté et le courage d'élaborer ce modeste travail.*

*Nous tenons à remercier spécialement notre encadrant Docteur **Ahmed OUARET**, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter notre réflexion.*

*Un grand merci à nos parents, qui ont toujours été là pour nous. Leur soutien inconditionnel, et leurs encouragements ont été d'une grande aide.*

*Nous voudrions exprimer notre reconnaissance envers les amis et collègues qui nous ont apporté leur soutien moral et intellectuel tout au long de nos démarches.*

*Enfin, nous remercions également les membres du jury d'avoir consacré leur temps à l'évaluation de notre modeste travail.*

*À tous ces intervenants, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude.*

# Dédicaces

**J**e dédie ce travail

*A ma famille, elle qui m'a doté d'une éducation digne, son amour a fait de moi ce que je suis aujourd'hui.*

*Particulièrement à mon père LYAZID, pour le gout à l'effort qu'il suscité en moi, de sa rigueur.*

*A toi ma mère LOUIZA.Y, ceci est ma profonde gratitude pour ton éternel amour, que ce projet soit le meilleur cadeau que je puisse t'offrir.*

*A vous mes sœurs (Saida, Nadia, Nabila) et mon frère (Nabil). Mes beaux frères (Abdelhak.H, Toufik.M), ainsi qu'à ma belle sœur (Noura) et mes neveux (lyna, maria, rassim) qui m'avez toujours soutenu et encouragé durant ces années d'études.*

*A toi ma meilleure amie (kenza latieme) quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurais jamais te remercier comme il se doit, ta présence à mes cotés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles.*

*A vous mes proches (Adem, Selma, Lydia, Hanane, Djamel, Bingo, Mizou, Billal, Hanine, Mazigh, Sihem, Sara, hocine) qui m'avez toujours soutenu et encouragé durant ces années d'études.*

*Sans oublier mon binôme Massi pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet.*

***Feriel !***

# Dédicaces

- ❖ *A mes parents adorables qui m'ont donné la vie, qui m'ont appris d'être nette et sincère et leur soutenance depuis ma scolarisation à ce jour.*
- ❖ *Aucun hommage ni remerciement ne saurait être suffisant.*
  
- ❖ *A mes cher frères et sœurs.*
  
- ❖ *A toute la famille Atmani.*
  
- ❖ *A tous mes Amis(es).*
  
- ❖ *A toute la promotion d'automatique.*
  
- ❖ *A mon binôme Ferial et toute sa famille.*

***Massi !***

## Table de matière

<i>Liste des abréviations</i> .....	i
<i>Liste des symboles</i> .....	ii
<i>Liste des tableaux</i> .....	iii
<i>Liste des figures</i> .....	iv
<b>Introduction générale</b> .....	1
<b><u>CHAPITRE I</u>: Etude et simulation du système chauffage bâtiment</b>	
I.1. Introduction .....	3
I.2. Motivation .....	3
I.3. Consommation énergétique des bâtiments .....	4
I.3.1. Cas d'Algérie .....	4
I.3.2. Cas mondial .....	4
I.4. Le besoin d'énergie dans le bâtiment .....	5
I.5. Energétique du bâtiment .....	6
I.5.1. Le bâtiment est un gros consommateur d'énergie .....	6
I.5.2. Le bâtiment devrait être confortable .....	6
I.6. Consommation énergétique de logements anciens et récents .....	7
I.7. Description de l'outil de simulation et le modèle de la pièce.....	9
I.7.1. Présentation du logiciel utilisé SIMBAD .....	9
I.7.2. Fonctionnalités de SIMBAD .....	9
I.8. Description du modèle de la pièce et de chauffage .....	10
I.8.1. Description du modèle de la pièce utilisée .....	10
I.8.2. Entrées et sortie de chauffage .....	11
I.8.3. Les caractéristiques de la pièce.....	12
I.9. Conditions météorologique .....	13
I.10. Les différents facteurs qui influent sur la température ambiante .....	13
I.11. Indicateurs de performances .....	14
I.12. Simulation du système sans régulation ( en boucle ouverte) .....	15
I.12.1. Premier scénario (entrées fixes) .....	15
I.12.2. Discussion des résultats .....	17
I.12.3. Deuxième scénario (entrées variables).....	17
I.12.4. Discussion des résultats.....	18
I.13. Conclusion.....	19

---

## **CHAPITRE II : Développement de la commande prédictive et la commande supervisée**

II.1. Introduction .....	20
II.2. La commande prédictive .....	20
II.3. Le principe de la commande prédictive .....	20
II.4. Les différentes techniques de la commande prédictive.....	21
II.5. Les principaux avantages et inconvénients de la commande prédictive.....	21
II.6. Commande prédictive fonctionnelle .....	22
II.7. Principe de la commande prédictive fonctionnelle .....	23
II.7.1. Modèle interne.....	23
II.7.2. Trajectoire de référence.....	24
II.7.3. Horizon de coïncidence .....	24
II.7.4. Objectif de la commande .....	25
II.8. Calcul de la commande PFC .....	26
II.9. Paramètre nécessaire à la mise en œuvre de la PFC.....	30
II.10. La commande PFC d'un système d'ordre élevé .....	30
II.10.1. Modèle interne sous forme parallèle .....	30
II.11. Simulation d'un processus de 2 <sup>ème</sup> ordre .....	32
II.11.1. Interprétation des résultats .....	35
II.12. La commande supervisée .....	35
II.13. Les Différentes Techniques de la Commande Supervisée .....	35
II.14. Modélisation par l'approche multi-modèle.....	36
II.15. Commande multi-contrôleurs .....	36
II.15.1. Limitations des stratégies de commande mono-contrôleur.....	36
II.15.2. Concept général de la commande multi-contrôleurs .....	36
II.15.3. Différentes structures de la commande multi-contrôleurs .....	37
II.16. Commande supervisée basée sur multi-modèles et multi-contrôleurs .....	38
II.16.1. Architecture de la commande supervisée basée sur multi-modèles et multi-contrôleur ....	39
II.17. Conclusion .....	39

## **CHAPITRE III : Application de la commande prédictive supervisée sur un système CVC**

III.1. Introduction.....	40
III.2. Les paramètres du système utilisés.....	40
III.3. Identification du système chauffage bâtiment.....	41
III.4. Application de la commande PFC.....	41
III.4.1. Algorithme de calcul de la commande .....	41

---

---

III.5. Simulation du système.....	43
III.5.1. Interprétation des résultats .....	46
III.6. Application de la commande supervisée sur le système .....	46
III.6.1. Commande supervisée de la commande basé sur le multi-modèle et multi-contrôleur.....	46
III.6.2. Architecture du système de commande .....	46
III.6.3. Choix des modèles et contrôleurs .....	47
III.7. Application de la commande supervisée basé sur le multi-modèle sur notre système .....	47
III.7.1. Description de la commande sous Matlab/Simulink.....	47
III.7.2. Résultats du système .....	48
III.7.3. Etude de la robustesse.....	51
III.7.4. Interprétation des résultats.....	52
III.8. Représentation graphique des différents indices .....	52
III.8.1. Interprétation des résultats .....	54
III.9. Conclusion .....	55
<b>Conclusion générale</b> .....	56
<b>Bibliographie</b> .....	57
<b>Annexes</b> .....	59

## Liste des abréviations

**ARMA** : Auto Regressif Moving Average

**ARMAX** : Auto Regressive Moving Average with eXogenous inputs

**APRUE** : Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie

**CVC** : Chauffage, Ventilation, Climatisation

**DMC** : Dynamic Matrix Control

**EPSAC** : Extended Prediction Self-Adapted Control

**GPC** : Generalized Predictive Control

**PFC** : Predictive Fonctionnal Control

**SED** : Systèmes à Evènements Discrets

**SIMBAD** : Simulator of Building and Devices

**TRBF** : Temps de Réponse en Boucle Fermée

## Liste des symboles

$u$  : Signal de la commande

$y_p$  : Signal de sortie de procédé

$y_M$  : Signal de sortie du modèle interne

$G_s$  : Le gain statique

$p$  : La variable de Laplace

$r$  : Le retard pur

$\tau$  : La constante de temps du modèle

$y_{réf}$  : La trajectoire de référence

$H$  : Point de coïncidence

$k$  : L'instant présent

$\Delta_p$  : Incrément de la sortie du procédé

$\Delta_M$  : Incrément de la sortie du modèle

$n_r$  : Un nombre entier de périodes comprises dans le retard

$T_e$  : La période d'échantillonnage

$y_{ref}$  : La trajectoire de référence

$\tau_{bf}$  : Constante du temps de la trajectoire de référence

$T_{Bo}$  : Le temps de réponse en boucle ouverte TRBO

$F_{accel}$  : Facteur d'accélération

$y_F$  : La réponse forcée

$y_L$  : La réponse libre

**Liste des tableaux**

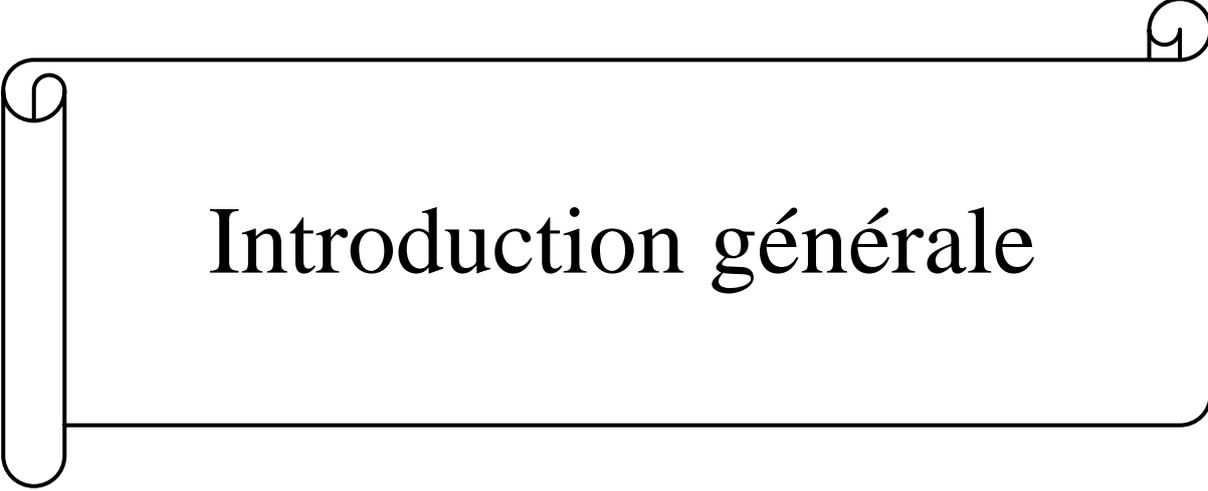
<b>Tableau I.1</b> : Représentation des caractéristiques du bureau.....	12
<b>Tableau I.2</b> : Représentation des entrées du système utilisées .....	15
<b>Tableau I.3</b> : Entrées variables.....	17
<b>Tableau II.1</b> : Paramètre utilisés dans le calcul PFC .....	30
<b>Tableau III.1</b> : Paramètres du système.....	40
<b>Tableau III.2</b> : Paramètre d'entrée du système.....	44

## Liste des figures

<b>Figure I.1</b> : Part mondiale des bâtiments et de la construction dans les émissions (2019).....	5
<b>Figure I.2</b> : Évolution des températures dans des bâtiments au cours de l'année, Sans effet des installations techniques de chauffage ou climatisation.....	7
<b>Figure I.3</b> : Consommation d'énergie dans les bâtiments.....	8
<b>Figure I.4</b> : Description de la pièce.....	10
<b>Figure I.5</b> : Modèle de la pièce utilisée avec le réchauffeur électrique .....	12
<b>Figure I.6</b> : Conditions climatiques mesurées pour la ville de Rennes, en janvier : température de l'air extérieur, rayonnement solaire direct et rayonnement solaire diffus.....	13
<b>Figure I.7</b> : Simulation en boucle ouverte (1 jours).....	16
<b>Figure I.8</b> : Simulation en boucle ouverte (5 jours).....	16
<b>Figure I.9</b> : Simulation en boucle ouverte (1 jours) .....	18
<b>Figure I.10</b> : Simulation en boucle ouverte (5 jour).....	18
<b>Figure II.1</b> : Evolution temporelle de la prédiction à horizon fini.....	21
<b>Figure II.2</b> : Principe de la commande prédictive fonctionnelle PFC .....	23
<b>Figure II.3</b> : Modèle interne : situation parallèle avec procédé .....	23
<b>Figure II.4</b> : Trajectoire de référence .....	24
<b>Figure II.5</b> : Point de coïncidence entre trajectoire de référence et sortie de procédé.....	25
<b>Figure II.6</b> : Incrément désiré de sortie de processus .....	25
<b>Figure II.7</b> : Incrément désiré de sortie de modèle au point de coïncidence .....	26
<b>Figure II.8</b> : Ecart entre la consigne et la trajectoire de référence .....	28
<b>Figure II.9</b> : Schéma bloc de la PFC sans retard pur .....	29
<b>Figure II.10</b> : Schéma bloc de la commande PFC avec retard pur .....	29
<b>Figure II.11</b> : Modèle parallèle d'ordre élevé de degré m .....	30
<b>Figure II.12</b> : Modèle interne parallèle. ....	33
<b>Figure II.13</b> : Simulation en boucle ouverte .....	34
<b>Figure II.14</b> : Sortie du système et la consigne .....	34
<b>Figure II.15</b> : Signal de commande.....	34
<b>Figure II.16</b> : Schéma de principe de la commande multi-contrôleurs .....	37
<b>Figure II.17</b> : Schéma global de la commande multi-contrôleurs (classe indirecte) .....	38
<b>Figure II.18</b> : Schéma global de la commande multi-contrôleurs (classe directe) .....	38
<b>Figure II.19</b> : Schéma global de la commande multi-modele multi-contrôleurs.....	39
<b>Figure III.1</b> : Chauffage d'une pièce avec des entrées reliées à la météo.....	41
<b>Figure III.2</b> : Modèle interne parallèle.....	42
<b>Figure III.3</b> : Réponse du système.....	44

---

<b>Figure III.4</b> : Réponse du système.....	45
<b>Figure III.5</b> : Réponse du système.....	46
<b>Figure III.6</b> : Architecture de la commande supervisée basée sur les multi-modèles et multi-contrôleurs.....	47
<b>Figure III.7</b> : Schéma de la commande multi-modèle, multi contrôleur implémentée sous Matlab/Simulink.....	48
<b>Figure III.8</b> : Sortie du système.....	49
<b>Figure III.9</b> : Contrôleur sélectionné par le superviseur.....	49
<b>Figure III.10</b> : Sortie du système.....	50
<b>Figure III.11</b> : Contrôleur sélectionné par le superviseur.....	51
<b>Figure III.12</b> : Sortie du système.....	52
<b>Figure III.13</b> : Contrôleur sélectionné par le superviseur.....	52
<b>Figure III.14</b> : Représentation graphique de l'indice de stabilité de la commande.....	53
<b>Figure III.15</b> : Représentation graphique de l'indice de confort.....	54
<b>Figure III.16</b> : Représentation graphique de l'indice de consommation.....	54



# Introduction générale

## Introduction générale

A l'heure actuelle, les bâtiments sont responsables d'environ 36 % de la consommation d'énergie finale mondiale [1]. Les systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation (CVC) consomment des quantités importantes d'énergie dans les bâtiments résidentiels et commerciaux pour assurer le confort thermique des occupants [2], la consommation directe d'énergie fossile dans le bâtiment n'a pas diminué depuis 2010 [1]. Malgré certains progrès, la demande d'énergie est en continuelle croissance.

Croissance démographique, demande croissante de services de construction confort, et augmentation du temps passé dans le bâtiment, ce qui signifie la tendance de la demande énergétique future continuera à augmenter. Dans les services suivants bâtiment, l'augmentation de la consommation d'énergie du système CVC est particulièrement important, dont le chauffage est le coupable [2].

Pour cette raison, on se pose la question : quelle est la méthode efficace qui pourra satisfaire le compromis entre le confort thermique et la consommation énergétique ? La commande prédictive supervisée semble une technique prometteuse pour résoudre ce problème d'optimisation secteur de construction. En bref, cette technique implique la résolution répétitive chaque période d'échantillonnage du problème de contrôle optimal. Ça dépend de l'utilisation du modèle dynamique du système à réguler (ici le bâtiment) permet de prévoir son comportement futur, utilisant un ensemble de modèles et de contrôleurs. Cet objectif semble suffisant pour justifier l'utilisation de la commande prédictive supervisée dans ce cas.

Le principal objectif de ce travail est de développer une méthode de contrôle supervisé basée sur l'utilisation de la commande prédictive fonctionnelle appliquée au système de chauffage pouvant s'adapter aux différentes conditions de fonctionnement, dans le but de réduire la consommation d'énergie et d'assurer un bon confort thermique aux occupants. Pour notre travail, nous allons utiliser un modèle de simulation conçu par le CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment), ce modèle simule le chauffage d'une pièce à l'intérieur d'un bâtiment, en prenant en considération tous les facteurs qui influencent sur la température ambiante d'une pièce. Ce modèle nous fournit un système à contrôler par une entrée connectée à un radiateur et une sortie qui nous donne la température interne de la pièce. Le cas étudié est un bureau de travail dans un bâtiment qui est considéré comme un processus non linéaire complexe provenant de la boîte à outils SIMBAD intégrée dans Matlab.

Pour une meilleure présentation des travaux abordés, ce manuscrit est structuré de la manière suivante :

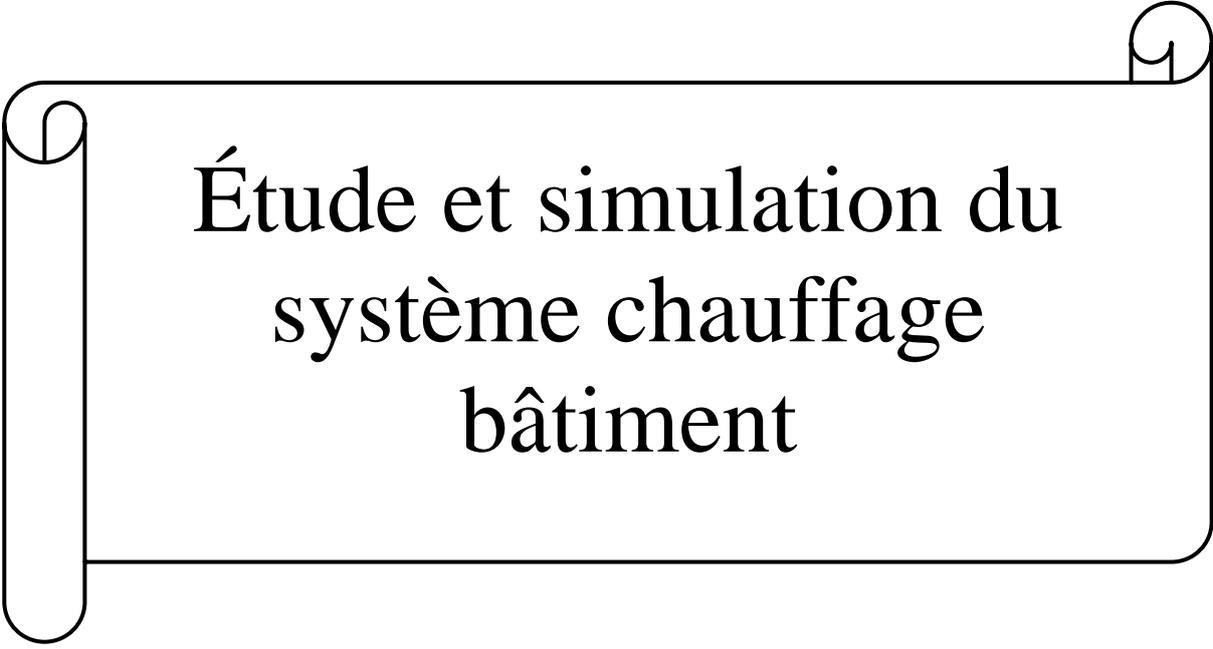
Le **premier chapitre** présente l'intérêt des bâtiments dans la consommation énergétique totale, dont le chauffage est le premier responsable de cette consommation, puis une présentation des outils de simulation, dont la bibliothèque SIMBAD et ses différents modèles. Et ce chapitre termine par la simulation en boucle ouverte pour voir l'influence des facteurs interne et externe de la pièce traitée sur le système et ceci à l'aide de la boîte à outil SIMBAD.

Le **deuxième chapitre** est structuré pour donner un aperçu de ces deux commandes, on donne d'abord un aperçu de la commande de prédiction, puis on se concentre sur la méthode de prédiction fonctionnelle, ainsi que sur son fonctionnement. Et par la suite, On s'intéresse à la commande supervisée on donne une petite présentation de cette commande puis on décrira brièvement les différentes techniques de cette commande.

Le **troisième chapitre** est consacré à la présentation de l'approche proposée qui est la commande prédictive supervisée basée sur l'utilisation de la commande prédictive fonctionnelle. La dernière partie est dédiée à l'application de cette stratégie sur le système de chauffage bâtiment dont l'objectif est de contrôler la température ambiante dans une pièce.

Enfin, on termine par une conclusion générale et les perspectives envisagées.

# CHAPITRE I



Étude et simulation du  
système chauffage  
bâtiment

## **I.1. Introduction**

Assurer une ambiance intérieure bien adaptée à ces besoins et à son confort, est la première préoccupation de l'habitant, puis en deuxième lieu on trouve à l'économie d'énergie.

C'est pour cela dans la première partie de ce chapitre on donne l'intérêt des bâtiments dans la consommation énergétique totale, dont le chauffage est le premier responsable de cette consommation, puis nous ferons une présentation des outils de simulation, dont la bibliothèque SIMBAD et ses différents modèles. Enfin dans la dernière partie de ce chapitre on termine par la simulation en boucle ouverte pour voir l'influence des facteurs interne et externe de la pièce traitée sur le système et ceci à l'aide de la boîte à outil SIMBAD.

## **I.2. Motivation**

Pour bien comprendre les implications de notre approche, il est important de rappeler que sans occupants, les bâtiments n'ont pas de raison de consommer de l'énergie. L'être humain a développé sans cesse des stratégies et des techniques pour se protéger des agressions climatiques et l'amélioration de la qualité de vie. Les humains passent plus de 80% de leur temps dans les bâtiments, qui offrent aux individus à la fois des environnements de vie et de travail. De plus, le secteur du bâtiment est le secteur ayant la plus grande part de la demande énergétique de tous les secteurs économiques, et cette consommation continuera d'augmenter, même si elle devrait diminuer.

Dans le cas particulier du tertiaire, le chauffage représente la part la plus importante de la consommation. Dans la conception et l'exploitation des bâtiments, une grande attention doit être portée à la qualité de l'environnement pour cela que nos travaux ont été menés pour offrir un meilleur contrôle du chauffage et pour réduire la consommation d'énergie et maintenir un confort pour les occupants nous avons donc proposé des commandes qui sont capables de s'adapter aux différentes conditions d'usager.

Les émissions du résidentiel et du tertiaire dépendent beaucoup des conditions climatiques. Elles baissent quand les températures sont douces et augmentent lorsque le climat devient plus rigoureux.

## **I.3. Consommation énergétique des bâtiments**

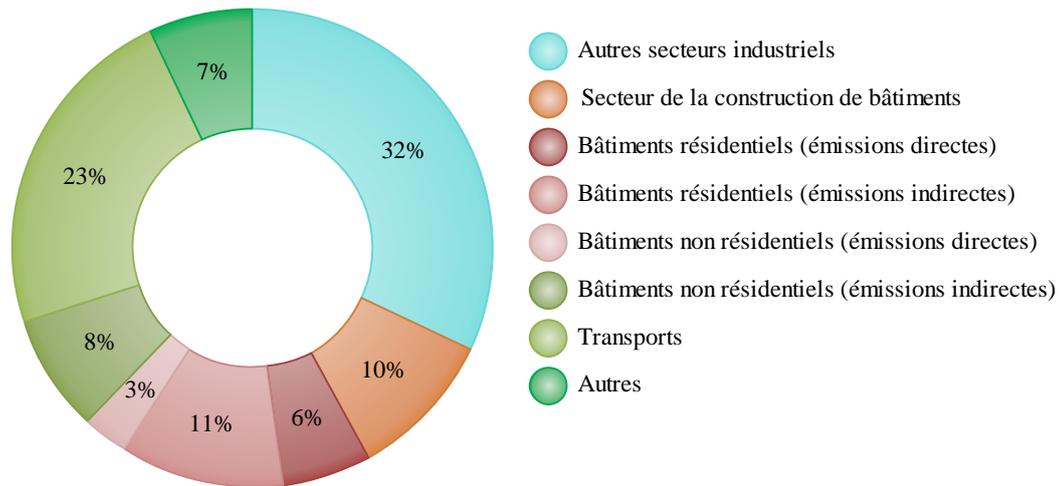
### **I.3.1. Cas d 'Algérie**

Le secteur du bâtiment est le premier consommateur d'énergie en Algérie, il absorbe 41% de la consommation totale d'énergie finale, a indiqué en 2019 à Alger un responsable à l'APRUE (l'Agence nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie).

« Le secteur du bâtiment est un secteur non productif mais énergivore, puisqu' il consomme 41% de l'énergie finale, devançant le secteur agricole qui absorbe 33% de l'énergie ainsi que le secteur industriel et celui des transports avec des taux respectifs de 19% et 7% », a précisé le chef de département bâtiment auprès de l'APRUE, Tahar Moussaoui. Il existe plusieurs facteurs qui accélèrent la demande en énergie domestique dans ce secteur notamment le parc immobilier toujours en constante augmentation, les services (hôtelleries, hôpitaux...), la croissance démographique. L'objectif c'est de réduire la consommation résidentielle et tertiaire de 10 à 15% d'ici l'horizon 2030, ajoutant que la politique nationale de l'efficacité énergétique mise sur les nouveaux logements à travers l'introduction de certaines normes dont l'isolation thermique des bâtiments et le double vitrage afin d'éviter la déperdition énergétique [3].

### **I.3.2. Cas mondial**

Bien qu'en 2019, dans le monde, la consommation énergétique finale du secteur des bâtiments se soit maintenue au même niveau que l'année précédente, les émissions de CO<sub>2</sub> liées à l'utilisation des bâtiments ont augmenté pour se porter à leur niveau le plus élevé jusqu'ici : près de 10 Gt (Giga tonne) de CO<sub>2</sub>, soit 28% du total des émissions mondiales relatives à l'énergie. Lorsqu'on y ajoute les émissions du secteur de la construction de bâtiments, ce pourcentage passe à 38%, contre 39% en 2018. Cette légère baisse s'explique par L'augmentation des émissions liées aux transports et aux autres secteurs par rapport à celles liées aux bâtiments [4].



**Figure I.1 :** Part mondiale des bâtiments et de la construction dans les émissions (2019)

Chaque année, le secteur du bâtiment émet plus de 123 millions de tonnes de CO<sub>2</sub>, ce qui en fait l'un des domaines clé dans la lutte contre le réchauffement climatique et la transition énergétique.

En effet, dans le monde entier, de nombreuses personnes doivent passer de plus en plus de temps chez elles ; ainsi, des bâtiments bien ventilés et économes en énergie sont primordiaux pour la santé publique, la qualité de l'air, l'accès au logement à des prix abordables et la reprise économique.

#### I.4. Le besoin d'énergie dans le bâtiment

Le besoin brut du bâtiment est la quantité d'énergie nécessaire pour maintenir, pendant une période de temps donné, un climat intérieur convenable et satisfaire les prestations du bâtiment (eau chaude, cuisson, éclairage, chauffage, climatisation, ...). Elle se caractérise par les différentes formes, c'est pourquoi elle est appelée « protéiforme ». Dans le bâtiment, le maintien d'un confort thermique agréable semble s'opposer aux recherches d'économie d'énergie. D'où, on ne pourra répondre à cette apparente contradiction que par une conception "globaliste" du bâtiment. Pour ce faire, il faut posséder de bonnes notions sur les paramètres climatiques, l'inertie thermique des bâtiments et leur localisation.

Cette approche du besoin d'énergie de chauffage et de climatisation renvoie trois facteurs explicatifs [6]:

- Le besoin en température ; est un besoin de climat intérieur, caractérisé par la température intérieure moyenne (qui explique principalement de façon quantitative le

besoin d'énergie de chauffage ou climatisation) ce besoin en température est, un besoin « social » ;

- Les caractéristiques physiques du logement qui interviennent de façon prépondérante dans la création du besoin d'énergie sont le volume et le degré d'isolation. D'autres caractéristiques importantes telles que l'exposition au soleil, au vent, le vitrage qu'on doit prendre en considération dès la conception et l'implantation ;
- Le climat du site, qui détermine la période du besoin.

## I.5. Energétique du bâtiment

### I.5.1. La place de bâtiment dans la consommation

Le bâtiment est classé comme étant un secteur énergivore ; en conséquence, il est source d'une partie non négligeable de la pollution [4].

Cette énergie est l'objet de nombreux usages, notamment :

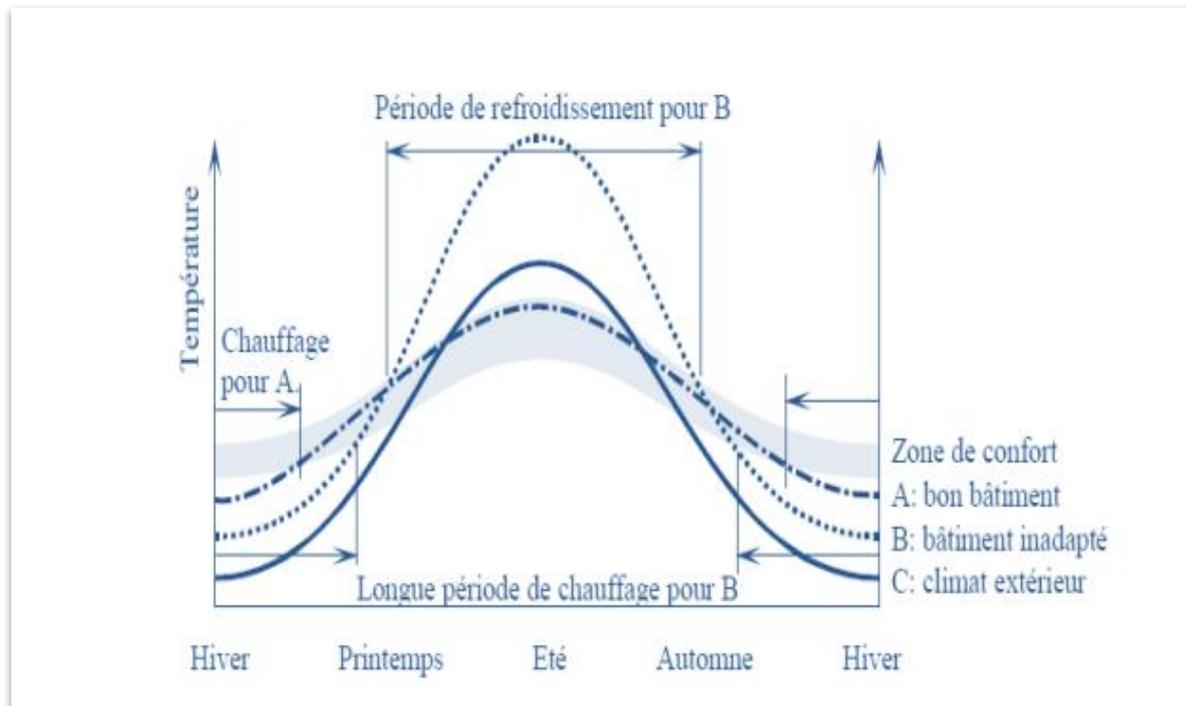
- Le chauffage et/ou le refroidissement, pour assurer un climat intérieur confortable ;
- La circulation de fluides tels que l'air (ventilation), l'eau (eau chaude, chauffage) ;
- Les transports (ascenseurs) ;
- L'éclairage ;
- Les communications (téléphone, radio, télévision) ;
- La production de biens (fabriqués, cuisines, couture, etc.).

Dans les **climats tempérés** et **froids**, la plus grande part de l'énergie utilisée par un bâtiment sert au chauffage. Le flux de chaleur généré dans le système de chauffage aboutit inévitablement à l'extérieur par différentes voies plus ou moins directes.

Dans les **climats plus chauds**, il peut être nécessaire et en tous cas confortable d'abaisser la température intérieure des bâtiments. Ce refroidissement, et l'assèchement de l'air (sous les tropiques) peut aussi être un grand consommateur d'énergie.

### I.5.2. Le confort dans un bâtiment

Si un bâtiment est bien conçu et construit, il peut fournir un confort nettement supérieur (courbe de la figure I.2). Un tel bâtiment ne surchauffe pas ou peu en été et profite des gains solaires pendant les périodes froides, pour raccourcir la saison de chauffage [4].



**Figure I.2 :** Évolution des températures dans des bâtiments au cours de l'année, sans effet des installations techniques de chauffage ou climatisation

La bande grisée représente les exigences de confort. **C** représente la température extérieure, **A** un bâtiment bien conçu et **B** un bâtiment inadapté à son climat.

Un bâtiment inadapté à son climat, a tendance à surchauffer en saison chaude et à être glacial en saison froide. Ces bâtiments consomment de grandes quantités d'énergie pour assurer un confort acceptable.

## I.6. Consommation énergétique du logement ancien et récent

Le schéma de la consommation d'énergie, ci-dessous, montre les très fortes variations dans la performance énergétique des logements "anciens" par rapport aux logements "actuels". Cependant, malgré le renforcement de l'isolation thermique et l'efficacité des équipements de chauffage, la consommation d'énergie globale ne cesse d'augmenter. Les raisons principales sont l'augmentation de la surface des logements par rapport au nombre d'occupants et une amélioration générale du confort.

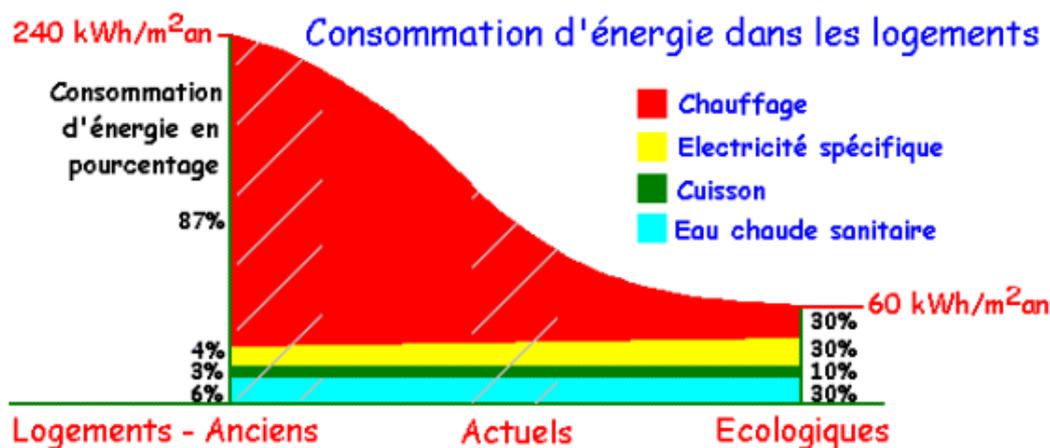


Figure I.3 : Consommation d'énergie dans les bâtiments

La figure I.3 représente la consommation d'énergie dans les bâtiments anciens, actuels et les bâtiments écologique :

- **Le chauffage (en rouge)**

La consommation d'énergie pour le chauffage d'un logement ancien est facilement divisée par 2 grâce à l'isolation thermique, l'utilisation de menuiseries et de vitrages performants, ainsi que l'installation d'équipements de chauffage moderne. Le chauffage représente 87% de la consommation d'énergie globale dans les logements anciens et seulement 30% dans les logements les plus performants.

- **L'électricité spécifique (éclairage et équipement électrique : en jaune)**

La consommation a tendance à augmenter dans tous les logements à cause de l'accroissement du nombre des équipements ménagers et de loisirs.

- **La cuisson (en vert)**

La consommation d'énergie pour la cuisine reste inchangée. Mais, ce poste marginal dans les logements anciens prend beaucoup plus d'importance quand la consommation baisse par ailleurs.

- **L'eau chaude sanitaire (en bleu)**

La consommation d'énergie pour produire de l'eau chaude est en légère augmentation, car le niveau de confort recherché dans les logements actuels est supérieur aux conditions acceptées dans le passé. Dans les logements anciens, ce poste ne représente que 6% de la consommation d'énergie globale, mais avec la réduction des besoins de chauffage, le poste "production d'eau chaude sanitaire" représente près de 30% de la consommation d'énergie dans un logement moderne [5].

En Effet, le bâtiment est considéré comme un secteur économique clé, fortement consommateur d'énergies et émetteur de gaz à effet de serre. On constate que la climatisation et le chauffage consomme une portion non négligeable en matière d'énergies. Pour améliorer les performances des systèmes de chauffage et de climatisation, il est Important pour l'étude des stratégies de contrôle, de nombreux outils de simulation ont été créés pour contourner les problèmes évoqués Auparavant, tout en fournissant des résultats satisfaisants par rapport à des cas réels, à titre d'exemple Bibliothèque SIMBAD que nous allons définir.

## **I.7. Description de l'outil de simulation et le modèle de la pièce**

### **I.7.1. Présentation du logiciel utilisé SIMBAD**

SIMBAD (Simulateur des Bâtiments et des équipements) est un outil développé en réponse à la difficulté et au coût des essais réels dans le domaine du bâtiment. C'est la première bibliothèque, destinée aux composants de génie climatique, pour l'environnement 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 [6].

### **I.7.2. Fonctionnalités de SIMBAD**

La bibliothèque de SIMBAD est constituée en plusieurs modèles :

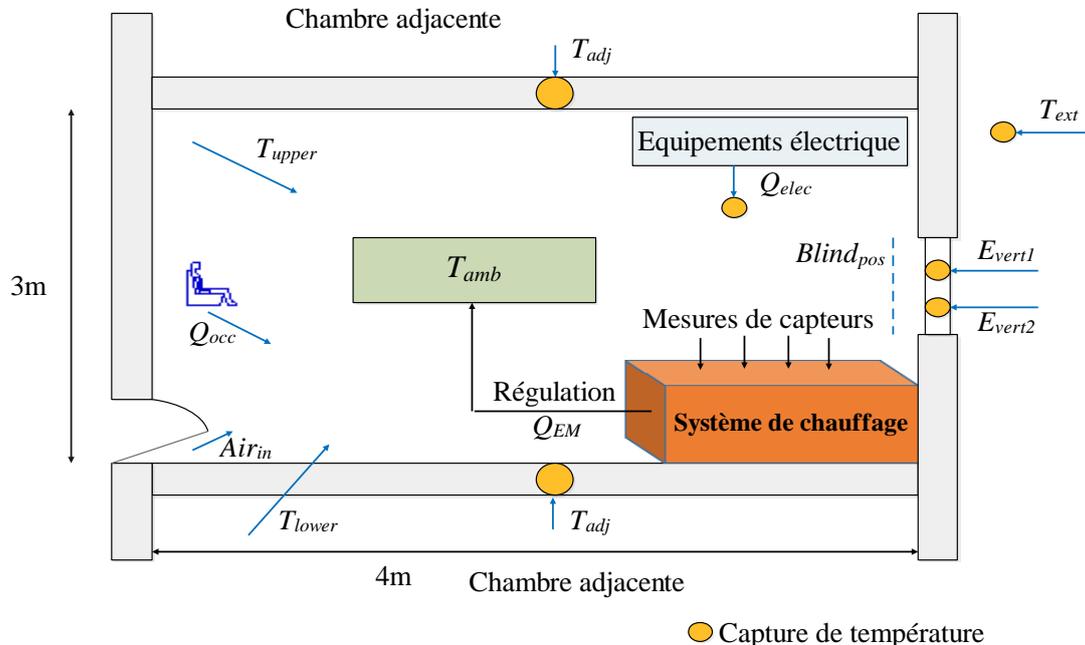
- **Modèle de zone** (Bâtiment mono zone avec des paramètres prédéfinis, modèles avec description détaillée des parois et fenêtres ou description zonale de l'ambiance intérieure.
- **Modèle multizone**: modèle de bâtiment multi zone. La description du bâtiment est réalisée à l'aide d'une interface graphique.
- **Production et de stockage** (pompe à chaleur, chaudière, ballon ...).
- **Éléments d'émission** (Ventilo-convecteurs, Boîte terminale, Plancher chauffant, radiateur...).
- **Éléments de régulation** (Régulateur de convecteur, régulateur central de système de chauffage à eau chaude, sondes...).
- **Scénarios météo, occupation...**

Chacun des modèles peut être modifié par l'utilisateur, afin de mieux s'intégrer dans la modélisation [7].

## I.8. Description du modèle de la pièce et de chauffage

### I.8.1. Description du modèle de la pièce utilisée

La figure I.4 représente le schéma réel de la pièce dont les entrées sont définies en flèches (bleues) et la sortie est aussi clarifiée par le carré en (vert) (température ambiante).



**Figure I.4 :** Description de la pièce

#### 1. Entrées du modèle

- $E_{vert1}$  [ $W/m^2$ ] et  $E_{vert2}$  [ $lux$ ] : rayonnement et illumination vertical global du soleil.
- $Blind_{pos}$  : position de l'abat-jour (rideau) prenant une valeur entre 0 et 1, 0 correspond à l'abat-jour complètement ouvert et 1 fermé.
- $T_{ext}$  [ $^{\circ}C$ ] : température venant du milieu extérieur.
- $T_{lower}$  [ $^{\circ}C$ ],  $T_{upper}$  [ $^{\circ}C$ ] et  $T_{adj}$  [ $^{\circ}C$ ] : température résultante de la salle adjacente en contact avec le plancher, le plafond et les murs internes de la salle traitée.
- $Q_{elec}$  [ $W$ ] et  $Q_{occ}$  [ $W$ ] : gains de chaleur délivrés par les équipements électriques et les occupants.
- $Q_{EM}$  [ $W$ ] : gain de chaleur du radiateur.
- $Air_{in}$  [ $^{\circ}C, g/kg, PA, kg/s$ ] : vecteur décrivant la circulation d'air entrant dans la pièce.

## 2. Sorties du modèle

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

## 3. Paramètres

- Longueur, largeur et hauteur de la pièce [m].
- Longueur et hauteur de la fenêtre [m].
- Type d'émetteur.
- Vecteur du coefficient de transfert de chaleur par convection à la surface interne et externe [ $W/m^2/K$ ].
- Température initiale de la pièce (vecteur des températures initiales de l'air, du sol, du plafond et des murs) [ $^{\circ}C$ ].

La figure I.4 nous montre aussi comment une régulation peut se faire à partir des mesures faite par des capteurs de température, des rayonnements de soleil et des gains de chaleur dégagés par les équipements électriques. Les mesures issues de ces capteurs seront reliées au système de chauffage afin de réaliser une régulation sur la température interne de la pièce.

### I.8.2. Entrées et sorties de chauffage

Les différentes entrées et sorties du chauffage sont données ci-dessous [8] :

#### ➤ 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 de réchauffeur.

#### ➤ Sorties

- **Flux de la chaleur** : la chaleur distribuée aux environnements [W].
- **$P_{elec}$**  : elle nous informe sur la consommation électrique du réchauffeur [W].

La figure I.5 représente le modèle de la pièce utilisée avec le réchauffeur électrique

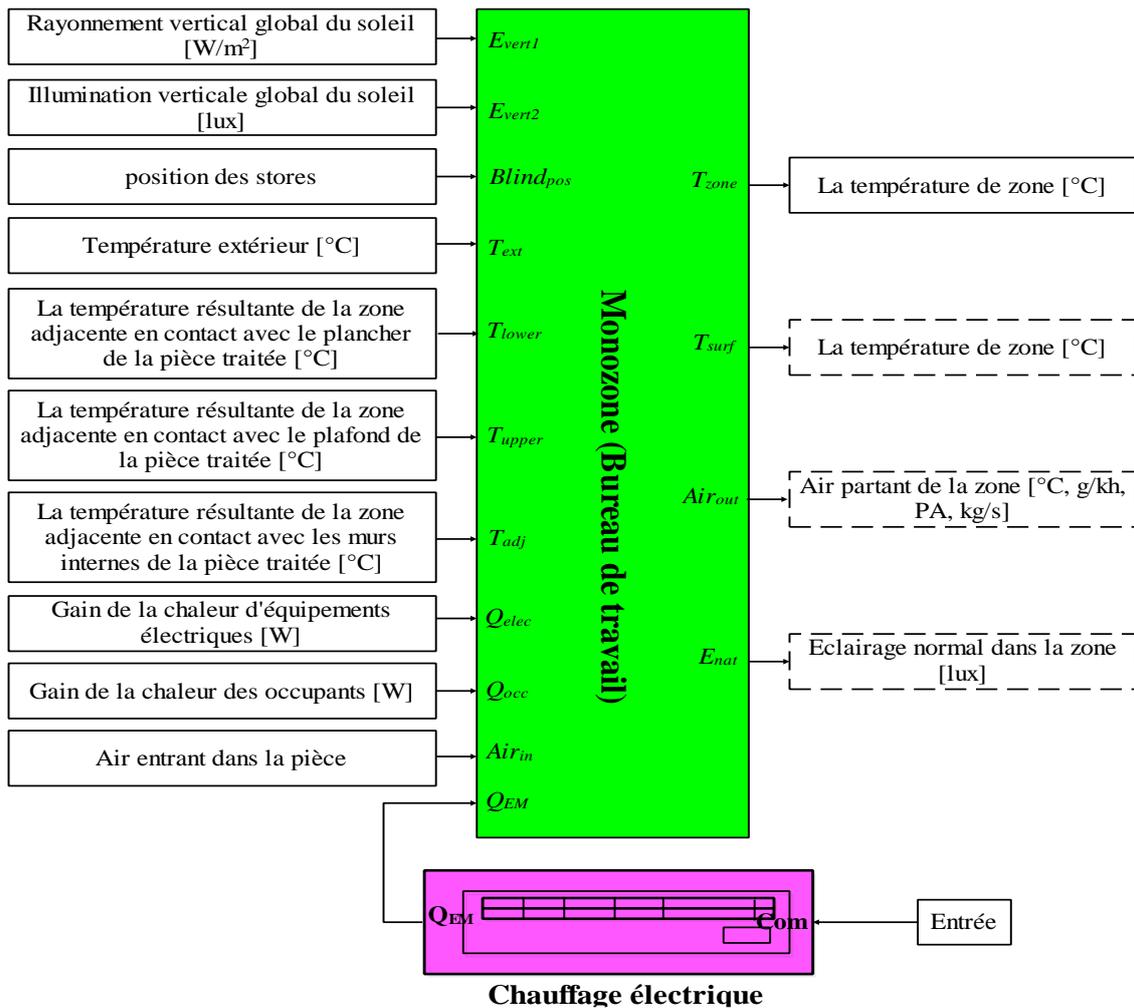


Figure I.5 : Modèle de la pièce utilisée avec le réchauffeur électrique

### I.8.3. Les caractéristiques de la pièce

La pièce choisie 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 I.1.

Tableau I.1 : Représentation des caractéristiques du bureau

Désignation et facteur de transfert thermique	Dimension
Dimension de zone (Longueur, Largeur, Taille)	4m, 3m ,3m
Dimension de fenêtre (Longueur, Taille)	2m, 1m
Coefficient de transfert thermique de (mur, plancher, plafond)	0.384261 W/m <sup>2</sup> /K, 0.4252315 W/m <sup>2</sup> /K, 0.3301951 W/m <sup>2</sup> /K
La température (initiale)	8°C
La température de référence pendant l'occupation	19°C
Puissance nominal de réchauffeur électrique	1500W

## I.9. Conditions météorologique

Le modèle de bâtiment virtuel (pièce) que nous considérerons dans la simulation est situé à Rennes, en France. Les données météorologiques utilisées pour simuler l'environnement dans lequel l'œuvre a été placée ont suivi les conditions climatiques mesurées pour la ville. Les perturbations externes considérées par le modèle sont la température de l'air extérieur, le rayonnement solaire direct et diffus en hiver. (La figure I.6 illustre l'évolution des trois perturbations extérieures) [9].

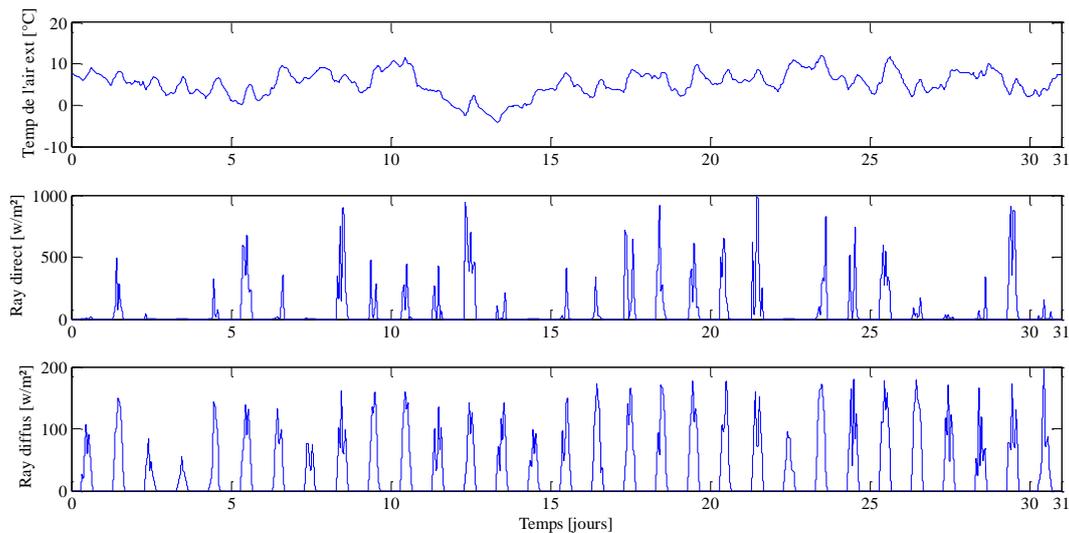


Figure I.6 : Conditions climatiques mesurées pour la ville de Rennes, en janvier

## I.10. Les différents facteurs qui influent sur la température ambiante

Les facteurs qui influencent sur la température ambiante d'un bâtiment sont décrits ci-dessous.

- **Le climat** : est le facteur le plus important agissant sur la demande du chauffage dans un bâtiment. Évidemment, plus il fait froid, la température diminue, plus le besoin en énergie pour le chauffage augmente.
- **Température des parois (murs et toits des pièces adjacentes)** : Un écart est autorisé dans la température ambiante, il ne saurait pour autant dépasser 3°C. La paroi absorbant le rayonnement à mesure de son refroidissement, on y remédie en utilisant des rideaux, des parois opaques isolées sinon à double vitrage.
- **La géométrie du bâtiment** : Elle 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.

- **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.
- **La méthode de contrôle** : Le contrôle du système de chauffage joue à la fois sur le confort thermique 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 tout-ou-rien ou P/PI/PID), un système piloté par une loi commande avancée (de type prédictif par exemple) et un système piloté par une loi de commande intelligente (réseaux de neurones par exemple).
- **Le mode de vie des occupants** : À un effet décisif sur la température ambiante, la négligence et les mauvaises habitudes peuvent influe directement sur la température ambiante dans le bâtiment.
- **Les apports de chaleur** : Provenant des occupants ou des différents appareils électriques peuvent avoir un effet appréciable dans certaines situations (salles de théâtre, cinéma, écoles, etc.).

### I.11. Indicateurs de performances

Pour vérifier l'efficacité de la méthode et la comparer à d'autres méthodes, nous avons défini quatre indicateurs de performance. Les deux premiers traduisent l'énergie consommée et le confort des occupants. Ils se définissent naturellement ainsi :

- **La consommation énergétique**, en [kWh], pendant la période d'étude :

$$I_{cons} = \int_{t_0}^{t_f} P(t) dt \quad [kWh] \quad (I.1)$$

- **L'indice de confort** : pénalise l'écart entre la température de la pièce et la température de référence, mais uniquement lors des périodes d'occupation de la pièce, ce qui donne, en [°Ch] :

$$I_{conf} = \int_{t_0}^{t_f} |T_{ref}(t) - T_{amb}(t)| dt \quad [°Ch] \quad (I.2)$$

Les deux derniers indices n'ont pas un impact direct sur la consommation ou le confort mais sont également importants d'un point de vue plus automatique. Ils mesurent les phénomènes oscillatoires de la température et l'aspect continu de la commande :

- **L'indice de stabilité de la température** : Il mesure les oscillations de température et se construit à partir des écarts entre les maximums locaux de la température de la pièce et de la température désirée durant la période d'occupation. Ce qui donne en [°C] :

$$I_{ST} = \frac{\sum(\text{localmax}(|T_{amb}(t) - T_{ref}(t)|))}{\text{whileoccupancy}} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{I.3})$$

- **L'indice de stabilité de la commande** correspond à une moyenne pondérée de la variation de commande, et dépend de la période d'échantillonnage  $T_s$  :

$$I_{SC} = \frac{\text{mean}(|u(t+1) - u(t)|)}{T_s} \quad (\text{I.4})$$

## I.12. Simulation du système sans régulation (en boucle ouverte)

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 aux variations des différents facteurs qui agissent sur le système.

### I.12.1. Premier scénario (entrées fixes)

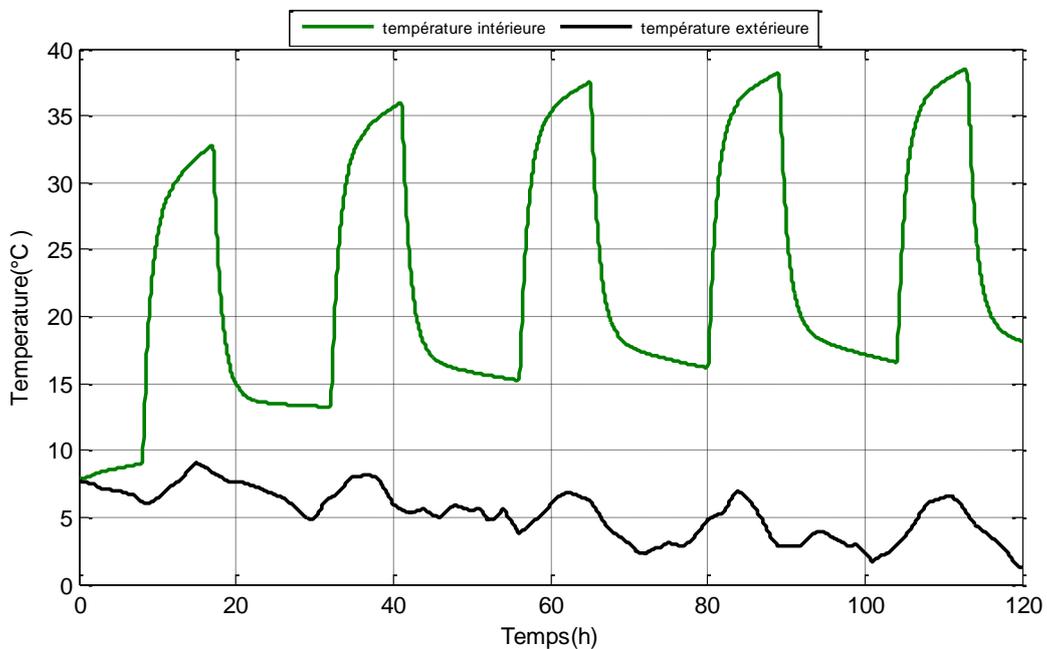
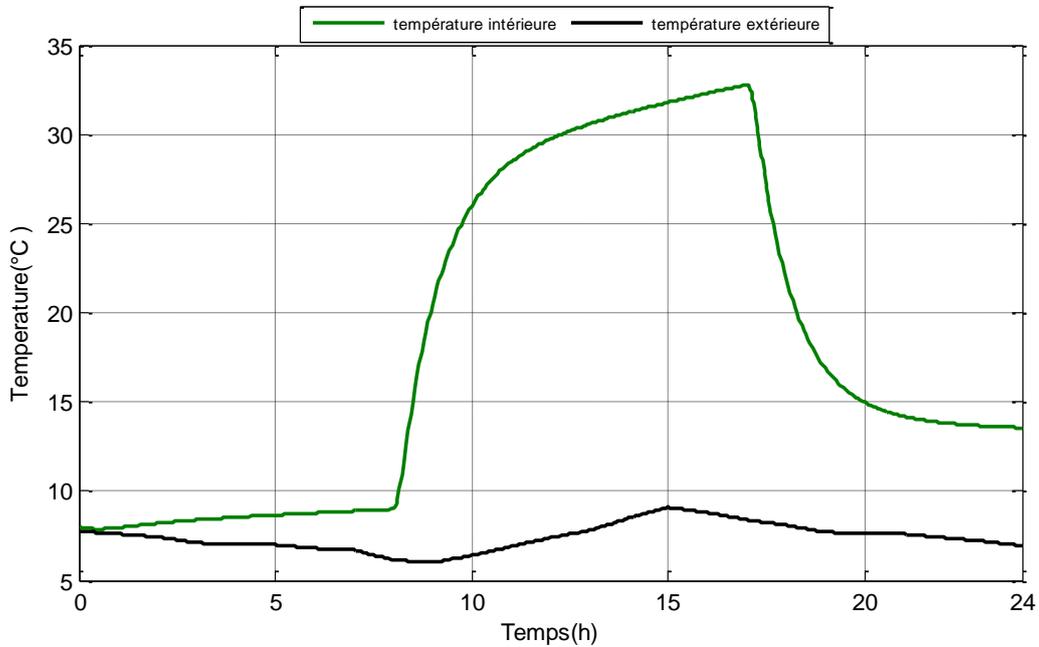
Dans ce scénario, notre système est isolé, cela veut dire que le rayonnement solaire n'influe pas sur la pièce, il n'y a pas de chaleurs dégagés par les occupants et les équipements, d'autres facteurs sont illustrés dans le tableau ci-dessous.

On a réalisé des simulations pour une journée et pour 5 jours, on a obtenu les figures I.6 et I.7 représentées ci-dessous :

**Tableau I.2** : Représentation des entrées du système utilisées

Entrés	Valeurs
$E_{vert1} [W/m^2]$ et $E_{vert2} [lux]$	(pas de radiations, pas d'illuminations)
$Blind_{pos}$	(Rideau fermé)
$T_{ext} [^{\circ}\text{C}]$	[-4 -4] (vecteur de la température extérieure)
$(T_{upper}, T_{lower}, T_{adj}) [^{\circ}\text{C}]$	[18 18]
$Q_{elec} [W]$ et $Q_{occ} [W]$	pas de chaleur dégagée par les équipements électriques, ni par les occupants
$Air_{in}$	Pas de circulation d'air dans la pièce
Intervalle d'occupation	8h00 : 17h00
Temps de simulation	1 jour et 5 jours

Données de la météo	Rennes
Puissance nominal de réchauffeur électrique	1500W
Saturation	0.5



### I.12.2. Discussion des résultats

On voit dans la figure I.7 qu'à 8 heures du matin (l'heure d'activation de chauffage), la température initiale est égale à (9°C), une demi-heure plus tard elle atteint la valeur de (19°C), à partir de ce moment la température continue d'en augmenter légèrement jusqu'à ce que le maximum soit (32,5 °C) à 17h00 (l'heure de désactivation de chauffage), ce qui se résume à l'effet des paramètres de la pièce sur la température.

A partir de 17h, le profil de température diminue fortement (18°C) du fait de l'arrêt du système de chauffage.

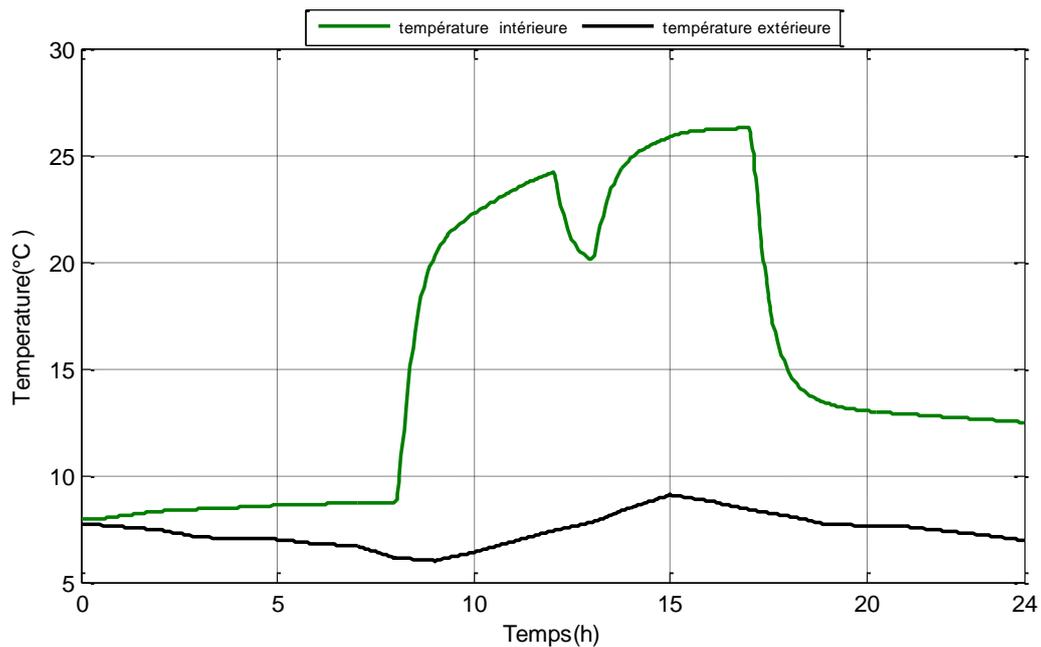
On peut voir sur la figure I.8 que la réponse sur 5 jours du système est similaire à la réponse sur un jour, sauf que la valeur initiale et la valeur maximale sont légèrement différentes, en raison de la chaleur emmagasinée au premier jour, donc la valeur maximale augmentera inévitablement.

### I.12.3. Deuxième scénario (entrées variables)

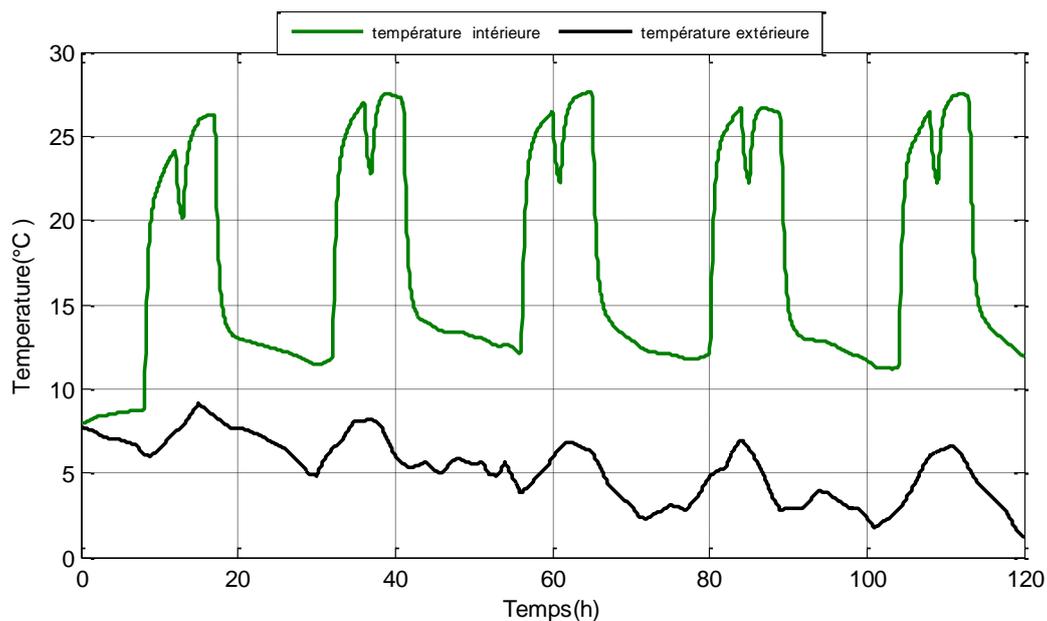
Le système est relié aux fichiers météorologiques, donc on a l'influence de tous les facteurs sur la température ambiante de la pièce dont le rayonnement soleil, ainsi la variation de la température extérieure ; la variation de la température des murs ; du plafond et la pénétration d'air dans la pièce.

**Tableau I.3 :** Entrées variables

Entrés	Valeurs
$E_{vert1}$ [ $W/m^2$ ] et $E_{vert2}$ [ $lux$ ]	Connectées à la météo
$Blind_{pos}$	1 ouvert la journée 0 fermé la nuit
$Text$ [°C]	La température extérieure.
$(T_{upper}, T_{lower}, T_{adj})$ [°C]	La température résultante de la zone adjacente en contact avec (le plafond, le plancher, le mur)
$Q_{elec}$ [ $W$ ] et $Q_{occ}$ [ $W$ ]	Gain de chaleur des (équipements électrique, occupants)
$Air_{in}$	Connecté à la météo (variable)
Intervalle d'occupation	8h00 : 17h00
Temps de simulation	1 jour et 5 jours
Données de la météo	Rennes
Puissance nominale	1500W
Saturation	0.5



**Figure I.9 :** Simulation en boucle ouverte (1 jours)



**Figure I.10 :** Simulation en boucle ouverte (5 jour)

#### I.12.4. Discussion des résultats

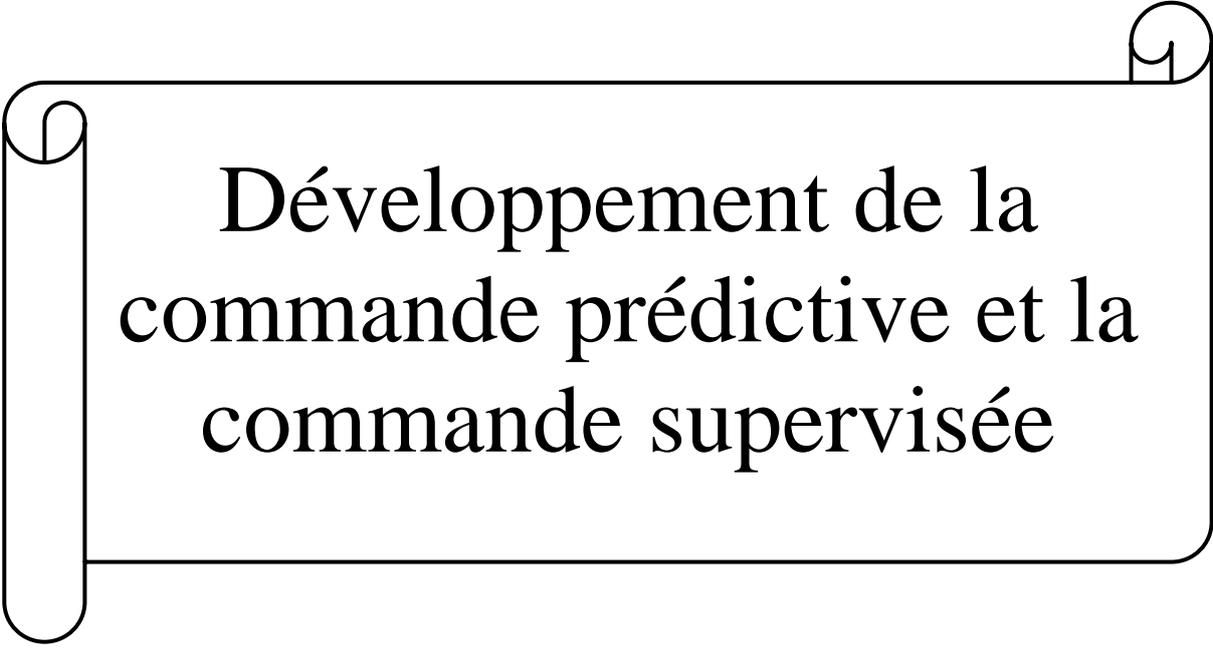
De la figure I.9 on voit que la température de la pièce atteint une valeur (24°C) à midi, qui est due à l'apport variable en fonction de la température extérieure liée à la météo, après quoi elle baisse (4°C) (midi à 13h) car il n'y a personne. Elle continue d'augmenter jusqu'à une valeur maximale (26,9°C) à partir de 13h. On remarque sur la figure I.10 que la courbe

est la même que celle répétée quatre fois par jour, mais avec des amplitudes différentes (température initiale, température maximale).

### **I.13. Conclusion**

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 pour cela dans ce chapitre on a présenté les données de consommation énergétique dans les différents secteurs d'activités et aussi on observe la réponse du système de chauffage par des simulations en boucle ouverte qui nous a permis de constater que plusieurs paramètres peuvent influencer sur la température ambiante d'une pièce. Plusieurs techniques de contrôle du chauffage des bâtiments ont été utilisées et feront l'objet du chapitre suivant.

## CHAPITRE II



Développement de la  
commande prédictive et la  
commande supervisée

## II.1. Introduction

Ces dernières années, plusieurs commandes dites avancées sont utilisées dans l'industrie afin de maintenir les variables de sortie proches de leurs consignes tout en respectant les contraintes opératoires du procédé. La commande prédictive et la commande supervisée ont été conçues pour remplir ces buts [10].

Ce chapitre est structuré pour donner un aperçu de ces deux commandes, c'est pourquoi dans la première partie du chapitre nous donnons d'abord un aperçu de la commande de prédiction, puis, nous nous concentrerons sur la méthode de prédiction fonctionnelle, ainsi que sur son fonctionnement. Principe et le calcul de la commande.

La deuxième partie de ce chapitre s'intéressera à la commande supervisée ou on donne une petite présentation de cette commande puis on décrira brièvement les différentes techniques de cette commande.

## II.2. La commande prédictive

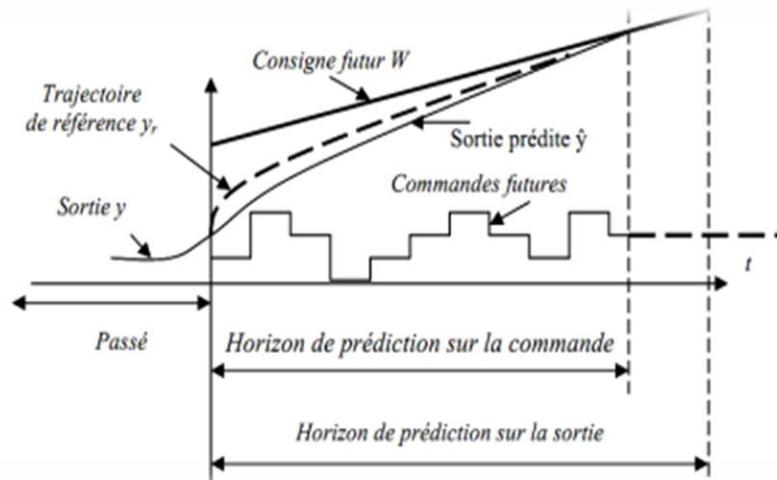
La commande prédictive est une technologie de contrôle automatique avancée, cette méthode a été inventée par un Français, J. Richalet, en 1978 et généralisée par D.W. Clarke en 1987 en accord avec de grands groupes industriels aux États-Unis et en Europe (Shell et Adersa). Son objectif est de contrôler des systèmes industriels complexes. Le principe de cette technique est d'utiliser un modèle dynamique du processus dans le contrôleur en temps réel pour prédire le comportement futur du processus. 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 [11].

## II.3. Le principe de la commande prédictive

Par conséquent, le principe du contrôle prédictif est de savoir que la sortie du processus est contrôlée, basée sur une trajectoire prédéfinie (trajectoire de référence) sur la sortie du procédé pour déterminer les commandes lui permettant de rejoindre la consigne graphique. Il s'agit donc de déterminer l'enchaînement des commandes à appliquer dans le futur. L'entrée du processus

pour atteindre la force de traction. Seule la première commande est appliquée, les autres commandes seront oubliées, car au prochain cycle d'échantillonnage, la séquence est décalée, la nouvelle sortie est mesurée et la séquence des opérations est ensuite relancé à chaque période d'échantillonnage selon le principe de l'horizon fuyant.

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** : Evolution temporelle de la prédiction à horizon fini

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

La commande prédictive est un terme général qui englobe un ensemble de méthodes différentes : PFC (Predictive Functionnal Control), DMC (Dynamic Matrix Control), GPC (Generalized Predictive Control) et EPSAC (Extended Prediction Self-Adapted Control).

Néanmoins, toutes ces techniques utilisent la même philosophie de contrôle et le principe de fonctionnement est le même. Cette technique est utilisée en majorité par des industries employant des échanges thermiques dans leurs procédés (chimie, pétrochimie) [12].

#### II.5. Les principaux avantages et inconvénients de la commande prédictive

- Elle peut être utilisée pour contrôler divers processus, ceux avec des dynamiques simples à ceux plus complexes.
- Elle compense essentiellement les retards ou les temps d'arrêt.
- Le correcteur obtenu est une loi de commande linéaire facile à mettre en œuvre et à temps de calcul court.

- Le traitement des contraintes sur le système à contrôler peut être systématiquement inclus dans la définition du correcteur.
- Ceci est utile si les consignes à suivre sont connues à l'avance [13].

Cependant, la commande prédictive présente certains inconvénients :

- L'obtention de la loi de commande nécessite plus d'efforts de calcul que la commande traditionnelle.
- Lorsque l'on considère les contraintes opérationnelles, la solution devient itérative et le temps de calcul devient très important.
- Dans le cas adaptatif, tous les calculs pour obtenir la loi de commande doivent être répétés à chaque période d'échantillonnage [18].

## **II.6. Commande prédictive fonctionnelle**

La commande prédictive fonctionnelle est conçue pour résoudre les problèmes de commande de processus moyennement complexes. Dans l'industrie, la PFC a obtenu un grand succès par rapport aux autres stratégies de contrôle MPC. Elle utilise un modèle non aligné (indépendant) avec deux parties : une autorégressive et une coercitive. Forcez la réponse à faire des prédictions basées sur la fonction effectuées à l'aide d'un modèle numérique du procédé à contrôler. Le calcul des éléments futurs d'une commande s'effectue dans un horizon de prévision formé par une suite de points appelés points de coïncidence. L'objectif est d'agrèger la sortie du processus à un point de consigne futur. Des calculs prédictifs coïncident. La sortie prévue doit alors coïncider avec la trajectoire de référence. Pour configurer une telle commande, nous devons suivre les étapes ci-dessous :

- Obtenir et représente le modèle du système
- Recherchez la formule de prédiction (parfois appelée prédicteur)
- Obtenir l'expression analytique de la commande à appliquer

Le principe de ce contrôle est structuré autour de quatre notions essentielles :

1. Le modèle
2. Le chemin de référence
3. L'ordre structuré
4. Compensation d'erreur de processus de modèle (auto-compensateur)

## II.7. Principe de la commande prédictive fonctionnelle

D'une manière générale, le système à réguler est considéré comme un système modélisable en suivant la représentation ARMA (Auto Regressive Moving Average) :

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

Ensuite, PFC est mis en œuvre selon ses propres principes.

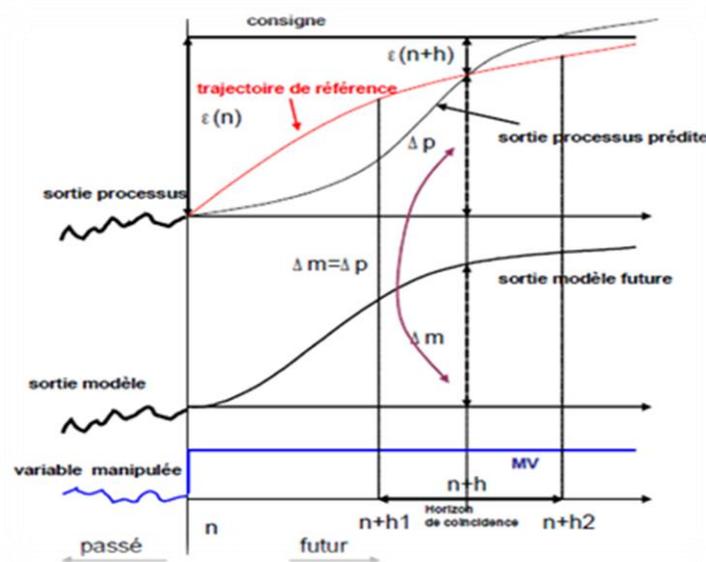


Figure II.2 : Principe de la commande prédictive fonctionnelle [14]

### 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 le calculateur de commande. Les paramètres de ce modèle sont obtenus par différentes techniques de modélisation et/ou d'identification de processus. Le but est de connaître le comportement futur du processus si on le soumet à une certaine entrée [15]. Bien sûr, la partie prédiction de la commande est garantie grâce à ce modèle. La figure ci dessous montre que pour une commande  $u(t)$ , on peut comparer les réponses du modèle  $y_M(t)$  et du procédé  $y_P(t)$ .

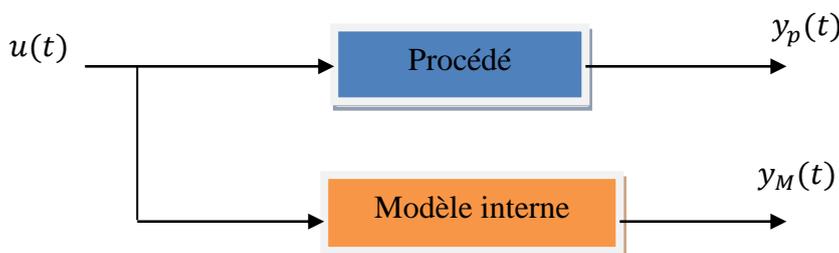


Figure II.3 : Modèle interne : Situation parallèle avec procédé

Le modèle est alors implémenté sous forme discrète : une équation aux différences finies, la fonction de transfert continue du processus de modélisation  $G(p)$  est donnée par la relation suivante :

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

avec :

$p$  désigne la variable de Laplace,  $G_s$  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 le but ultime de la commande, mais cette précision ne suffit pas, il faut définir comment cette consigne est atteinte. La trajectoire de référence est la trajectoire future que nous souhaitons idéalement qu'un processus régulé emprunte pour atteindre un point de consigne prescrit. C'est la dynamique qu'elle imposera en boucle fermée.

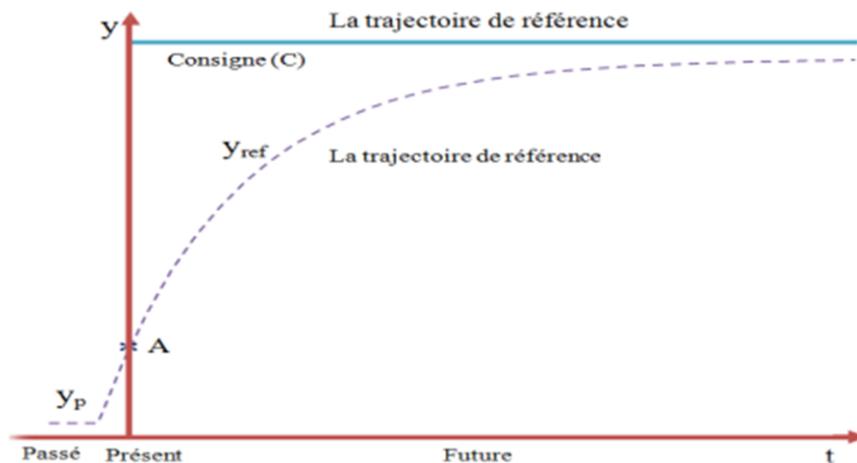
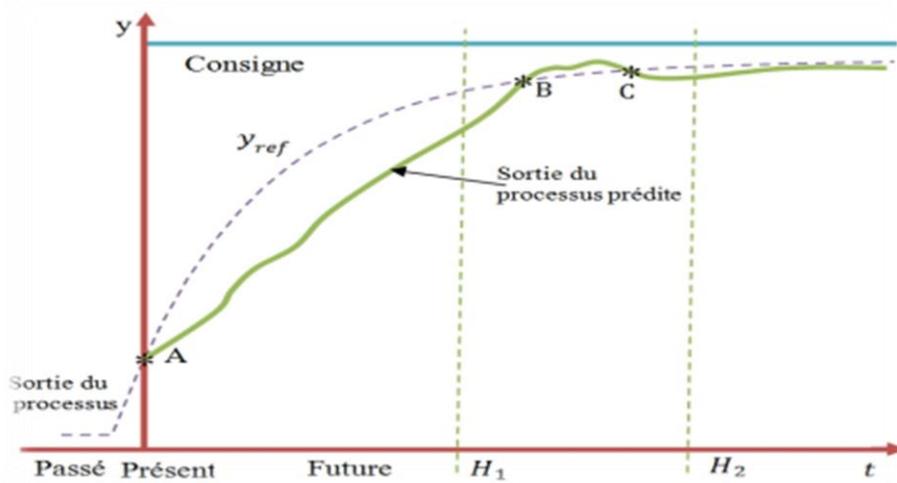


Figure II.4 : trajectoire de référence

### II.7.3. Horizon de coïncidence

Il faut définir un intervalle de temps  $[H1, H2]$  ou il y a au moins une correspondance entre la trajectoire de référence connue et la sortie du processus.



**Figure II.5 :** point de coïncidence entre trajectoire de référence et sortie de procédé

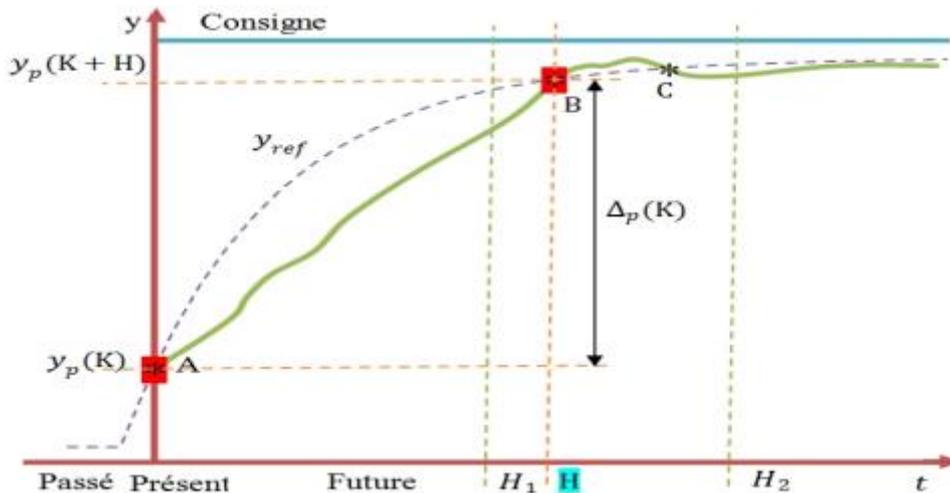
La figure II.5, les points *B* et *C* sont les points de coïncidence entre la trajectoire de référence  $y_{ref}(t)$  et la sortie du procédé  $y_p(t)$  dans l'intervalle  $[H_1, H_2]$ .

**II.7.4. Objectif de la commande**

On suppose que l'incrément de sortie du processus au moment de la rencontre est représenté par la relation suivante :

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

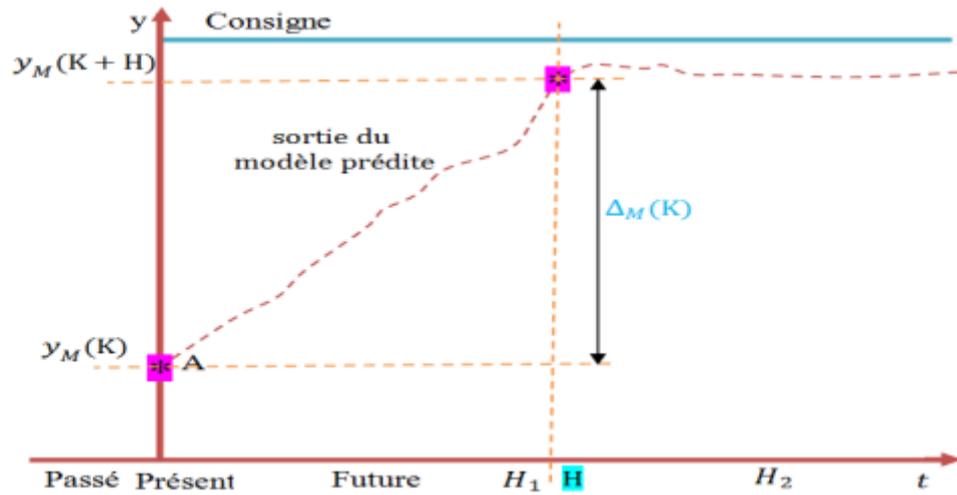
Où *k* représente l'instant présent.



**Figure II.6 :** Incrément désiré de sortie de processus

D'autre part, le modèle simule le comportement du processus, Nous pouvons également spécifier l'incrément souhaité dans l'espace du modèle.

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



**Figure II.7 :** Incrément désiré de sortie de modèle au point de coïncidence

Enfin, la commande appliquée au processus résulte de l'équivalence entre les deux incréments présentés.

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

## II.8. Calcul de la commande PFC

L'une des caractéristiques du contrôle PFC est la structuration de la méthode de contrôle. Cela correspond à la sélection du type de signal de référence à partir de la fonction de base du type : échelon, rampe, parabole etc. Ces fonctions de base sont utilisées dans la partie prédictive de contrôle prédictif. Comme déjà mentionné, l'ordre de prédiction vient de l'égalité entre la trajectoire de référence au point de coïncidence  $H$  et la sortie prédite du processus. La relation II.5 permet donc de trouver l'expression de la commande.

$$G(p) = \frac{K_p e^{-r_p p}}{1 + \tau_p p} \quad (\text{II.6})$$

On utilise un bloqueur d'ordre zéro :

$$B_0(p) = \frac{1 - e^{-T_e p}}{p} \quad (\text{II.7})$$

$$G_p(z^{-1}) = \frac{G_s(1 - e^{-T_e/\tau})z^{-1}}{1 - e^{-T_e/\tau}z^{-1}} z^{-nr} = \frac{y_M(z^{-1})}{u(z^{-1})} \quad (\text{II.8})$$

avec :

$T_e$  est la période d'échantillonnage.

$nr$  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  $\alpha = e^{-Te/\tau}$  (où  $\tau$  est la constante de temps), il vient :

$$y_p(k) = \alpha y_p(k-1) + G_s(1-\alpha)u(k-1-n_r) \quad (\text{II. 9})$$

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

$$y_M(k) = \alpha y_M(k-1) + G_s(1-\alpha)u(k-1) \quad (\text{II. 10})$$

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

$$u(k+1) = u(k+2) = \dots = u(k+H) = u(k) \quad (\text{II. 11})$$

Par conséquent, nous pouvons voir qu'il est possible de calculer la sortie au temps  $k+H$  en incrémentant la relation :

$$y_M(k+2) = \alpha y_M(k+1) + G_s(1-\alpha)u(k+1) \quad (\text{II. 12})$$

Que peut-on écrire :

$$\begin{aligned} y_M(k+2) &= \alpha[\alpha y_M(k) + G_s(1-\alpha)u(k)] + G_s(1-\alpha)u(k) \\ &= \alpha^2 y_M(k) + (\alpha+1)G_s(1-\alpha)u(k) \\ &= \alpha^2 y_M(k) + G_s(1-\alpha^2)u(k) \end{aligned} \quad (\text{II. 13})$$

De la même façon que la relation II.12 est incrémentée de 1, elle ressemble à ceci :

$$(k+3) = \alpha^3 y_M(k) + G_s(1-\alpha^3)u \quad (\text{II. 14})$$

Cette approche conduit à des équations du prédicteur :

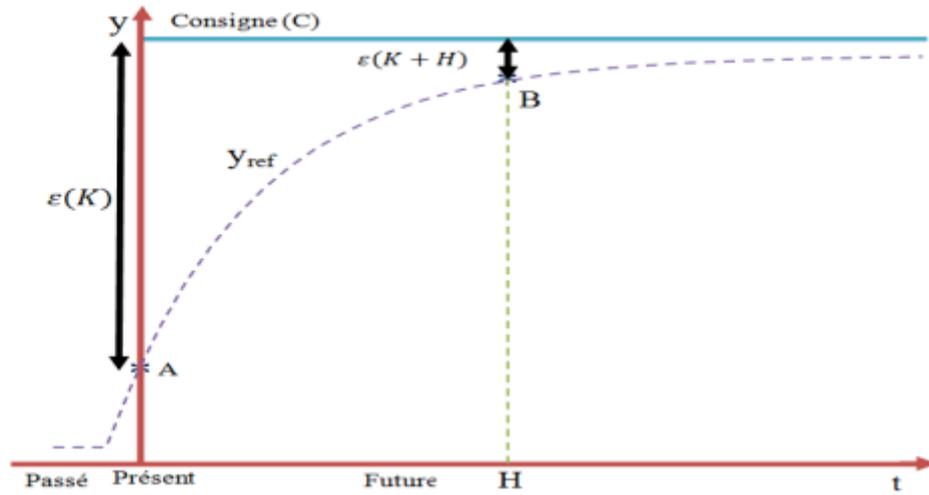
$$(k+H) = \alpha^H y_M(k) + G_s(1-\alpha^H)u(k) \quad (\text{II. 15})$$

La trajectoire de référence peut être définie en spécifiant le temps de réponse en boucle fermée souhaité (TRBF) et en sélectionnant la décroissance exponentielle de la déviation. Notez que le temps de réponse en boucle fermée est de 95 % de la valeur finale.

En utilisant la notation de la figure II.5, nous pouvons écrire :

$$\varepsilon(k) = C - y_{ref}(k) \quad (\text{II. 16})$$

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



**Figure II.8 :** Ecart entre la consigne et la trajectoire de référence

La trajectoire de référence est choisie de forme exponentielle, le décrement de l'écart entre la consigne et la sortie à l'instant  $(K+H)$  est donné par :

$$\varepsilon(k+H) = \varepsilon(k)e^{-TeH/\tau_{bf}} = \varepsilon(k)\lambda^H \quad (\text{II. 17})$$

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 :

$$\Delta_p(k) = y_{ref}(k+H) - y_{ref}(k) = C - \varepsilon(k+H) - y_{ref}(k) \quad (\text{II. 18})$$

En utilisant les relations II.16 puis II.17 l'expression de l'incrément de la sortie devient :

$$\Delta_p(k) = (1 - \lambda^H) (C - y_{ref}(k)) \quad (\text{II. 19})$$

Si les deux trajectoires de  $k+H$  correspondent,  $y_{ref}$  peut être remplacé par la mesure de sortie du processus de l'équation II.19.

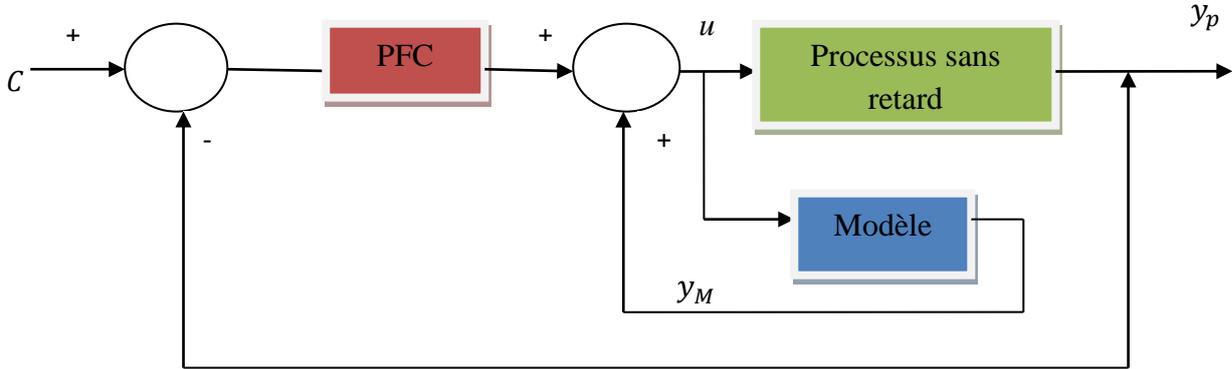
Comme pour le processus, l'équation II.15 peut être utilisée pour déterminer l'incrément de la sortie du modèle.

$$\begin{aligned} \Delta_M(k) &= y_M(k+H) - y_M(k) \\ \Delta_M(k) &= (1 - \alpha^H)G_s u(k) - y_M(k)(1 - \alpha^H) \end{aligned} \quad (\text{II. 20})$$

Comme l'objectif est d'avoir  $\Delta_p(k) = \Delta_M(k)$ , on peut tirer des équations II.18 et II.19 l'expression de la commande  $u$  :

$$u = \frac{(1 - \lambda^H)(C(k) - y_p(k))}{(1 - \alpha^H)G_s} + \frac{y_M}{G_s} \tag{II.21}$$

Cette commande correspond au schéma ci dessous :

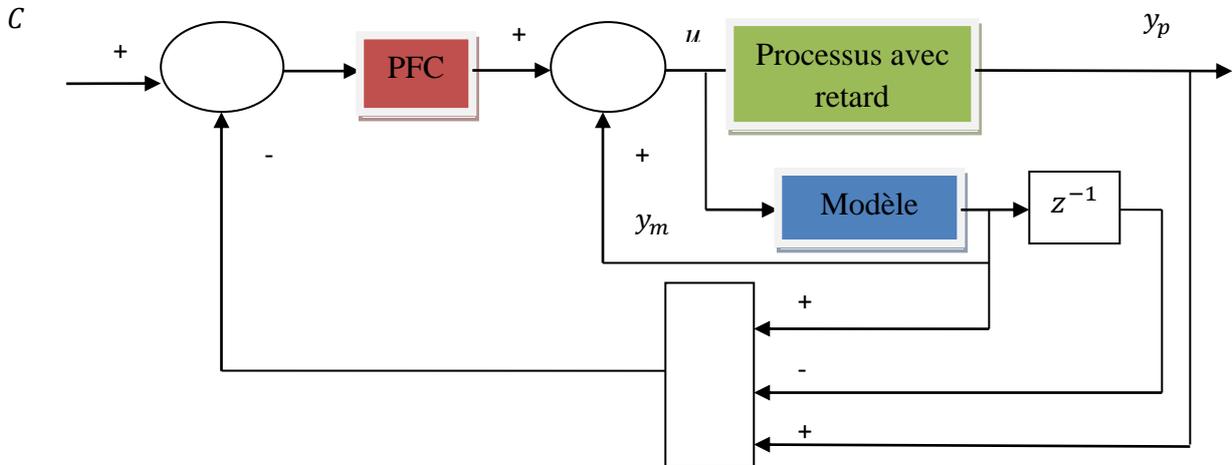


**Figure II.9 :** Schéma bloc de la PFC sans retard pur

Si nous souhaitons tenir compte des retards dans le processus, nous pouvons considérer les retards purs du processus et du modèle comme étant mis en série sur les sorties. En supposant une identification correcte des retards purs, la sortie de retard du processus ( $y_{p\ ret}$ ) peut être évaluée par la relation suivante :

$$y_{p\ ret} = y_p(k) - (y_M(k) - y_M(k - r)) \tag{II.22}$$

Nous pouvons donc estimer le signal  $y_p(k)$  requis pour le contrôle, et le nouveau schéma de contrôle est décrit dans la figure II.9.



**Figure II.10 :** Schéma bloc de la commande PFC avec retard pur

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

Si le paragraphe précédent permet de déterminer la forme de la loi de commande, des paramètres comme la période d'échantillonnage, la constante de temps en boucle fermée ou encore l'horizon de coïncidence qui on les utilise au calcul final sont définis au tableau ci-dessous.

**Tableau II.1** : Paramètre utilisés dans le calcul de la PFC

Le temps de réponse en boucle ouverte TRBO	$T_{Bo} = 3\tau$
Un facteur d'accélération de la réponse $F_{accel}$	$1 < F_{accel} < 3$
Le temps de réponse en boucle fermée	$T_{Bf} = \frac{T_{Bo}}{F_{accel}}$
La constante de temps en boucle fermée	$\tau_{bf} = \frac{T_{Bf}}{3}$
Le point de coïncidence $H$	$H = \text{ceil}(\frac{\tau_{bf}}{3T_e})$

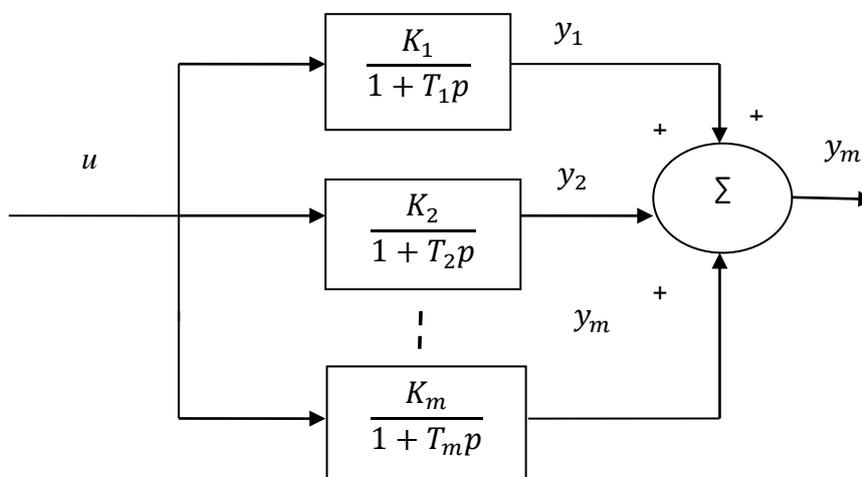
Où :

$\text{ceil}$  représente l'entier supérieur gain statique le plus proche pour éviter  $H=0$ ,  $H > tr$ ,  $G_s$  Gain statique, obtenu par un modèle interne physique,  $\tau$  constante de temps, obtenu par un modèle interne physique et  $r$  retard pur, obtenu par un modèle interne physique.

On note que l'obtention d'un modèle qui reflète parfaitement le processus physique est idéal.

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

### II.10.1. Modèle interne sous forme parallèle



**Figure II.11** : Modèle parallèle d'ordre élevé de degré  $m$

Pour un processus d'ordre élevé, la représentation de la fonction de transfert est basée sur une décomposition parallèle et est donnée par [16] :

$$G_M(p) = \sum_{i=1}^m \frac{k_i}{1+T_i p} \quad (\text{II. 23})$$

### a) Prédiction de la sortie

La sortie du modèle  $y_M(k)$  est :

$$y_M(k) = y_1 + y_2 + \dots + y_m \quad (\text{II. 24})$$

L'équation aux différences de la sortie:

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

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

D'où on a :

$$y_M(k) = \sum_{i=1}^m a_i y_i(k-1) + \sum_{i=1}^m k_i(1-a_i)u(k-1) \quad (\text{II. 26})$$

La réponse  $y_M(k)$  peut-être donc divisée en deux parties, l'équation (II. 27) représente la réponse libre et l'équation II.28 la réponse forcée

$$y_L(k+H) = \sum_{i=1}^m a_i^H y_i(k) \quad (\text{II. 27})$$

$$y_F(k+H) = \sum_{i=1}^m k_i(1-a_i)u(k) \quad (\text{II. 28})$$

### 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 :

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

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

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

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

$$y_p(k+H) = y_M(k+H) + y_p(k) - y_M(k) \quad (\text{II. 31})$$

En remplaçant  $y_M(k + H)$  par son expression de (II.24), nous obtenons

$$y_p(k + H) = \sum_{i=1}^m y_i(k + H) + (y_p(k) - \sum_{i=1}^m y_i(k)) \quad (\text{II.32})$$

### 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.27) (II.28) (II.32), on obtient :

$$\begin{aligned} C(k)(1 - \lambda^H) - y_p(k)(1 - \lambda^H) + y_1(k)(1 - a_1^H) + y_2(k)(1 - a_2^H) + \dots + y_m(k)(1 - a_m^H) \\ = (k_1(k)(1 - a_1^H) + k_2(k)(1 - a_2^H) + \dots + k_m(k)(1 - a_m^H))u(k) \end{aligned} \quad (\text{II.33})$$

D'après l'équation II.33 la loi de commande  $u(k)$  est :

$$u = \frac{(1 - \lambda^H)(C(k) - y_p(k))}{\sum_{i=1}^m k_i (1 - a_i^H)} + \frac{\sum_{i=1}^m y_i(k)(1 - a_i^H)}{\sum_{i=1}^m k_i (1 - a_i^H)} \quad (\text{II.34})$$

## II.11. Simulation d'un processus de 2<sup>ème</sup> ordre

Soit un système de troisième ordre décrit par la fonction de transfert suivante :

$$H(p) = \frac{1.2}{300p^2 + 35p + 1} \quad (\text{II.35})$$

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

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

$$H(p) = \frac{K1}{(1+T_1P)} + \frac{K2}{(1+T_2P)} \quad (\text{II.36})$$

Les paramètres de la fonction de transfert sont :

Le gain :  $K = 1.2$

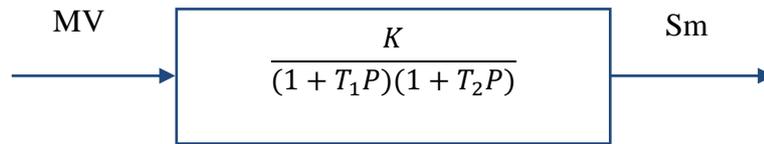
La constante du temps :  $T_1 = 20s; T_2 = 15s$

$$K1 = \frac{KT_1}{(T_1 - T_2)} = 4.8 ; K2 = \frac{KT_2}{(T_1 - T_2)} = -3.6 \quad (\text{II.37})$$

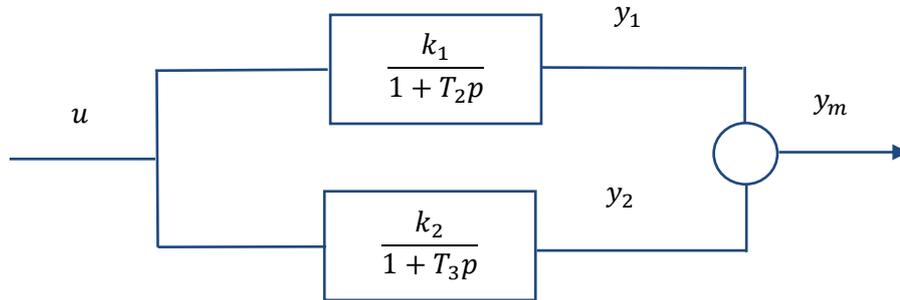
La contrainte est imposé sur la variable manipulée (la commande) avec les valeurs suivantes :

$u_{max} = 60$ ; valeur max de  $u$

$u_{min} = -10$ ; valeur min de  $u$



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



**Figure II.12** : Modèle interne parallèle

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

$$y_M(k+H) = \alpha^H y_M(k) + K_M(1 - \alpha^H)u(k) \quad (\text{II.38})$$

$$u = \frac{(1 - \lambda^H)(C(k) - y_p(k))}{(1 - \alpha^H)k_M} + \frac{y_M}{k_M} \quad (\text{II.39})$$

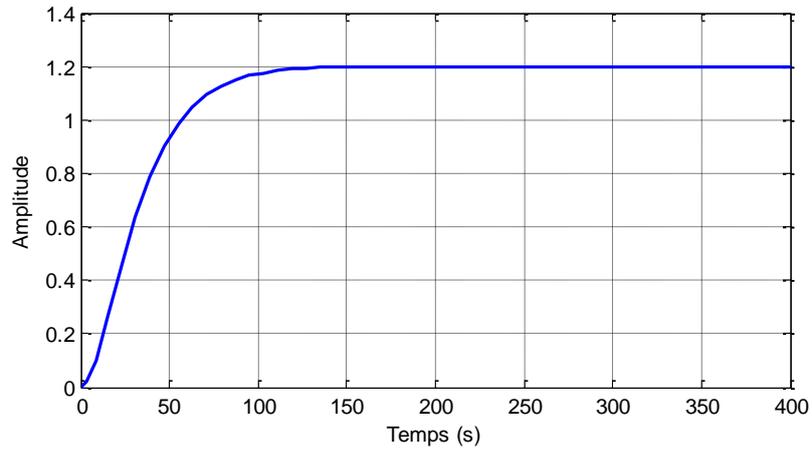
La loi de commande à appliquer est celle de l'équation (II.33) :

$$u = \frac{(1 - \lambda^H)(C(k) - y_p(k))}{\sum_{i=1}^m k_i(1 - a_i^H)} + \frac{\sum_{i=1}^m y_i(k)(1 - a_i^H)}{\sum_{i=1}^m k_i(1 - a_i^H)} \quad (\text{II.40})$$

Les paramètres du régulateur PFC sont :

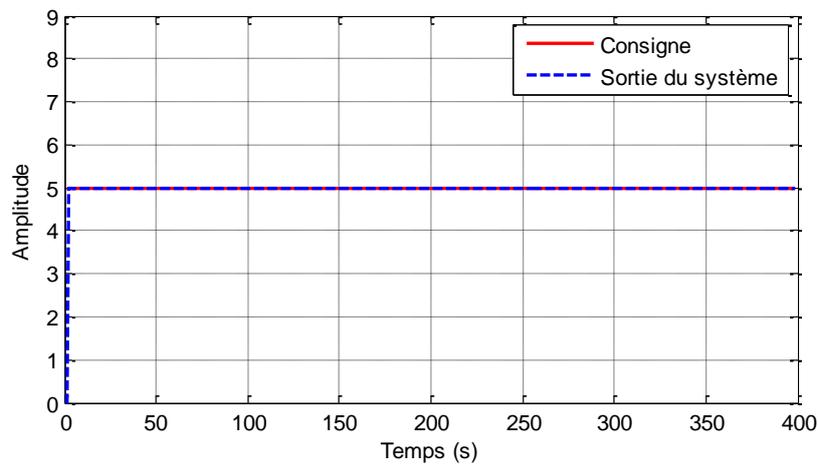
$$F_{accel} = 1; \quad T_{Bf} = 0.0015s; \quad h = 1; \quad T_e = 60s$$

Après simulation du système en boucle on a obtenu la figure II.13.

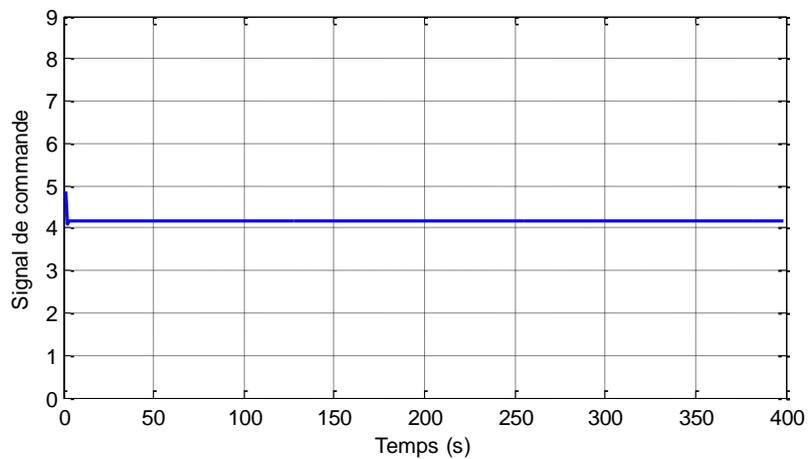


**Figure II.13 :** Simulation en boucle ouverte

Après l'application de la PFC on a obtenu les figures (II.14) et (II.15) :



**Figure II.14 :** Sortie du système et la consigne



**Figure II.15 :** Signal de commande

### II.11.1. Interprétation des résultats

La figure II.13 représente la simulation en boucle ouverte du système 2<sup>ème</sup> ordre qui augmente jusqu'à la valeur 1.2 et se stabilise a cette valeur la .

Les figures II.14, II.15 représentent respectivement la sortie prédite et la commande du système de 2<sup>ème</sup> ordre à une consigne d'amplitude 5; on remarque que la sortie du système suit parfaitement la consigne. Et pour le signal de commande, on constate qu'il est stable à une valeur d'amplitude 4,2, ce qui indique la stabilité de la commande.

### II.12. La commande supervisée

Ces dernières années, diverses définitions du contrôle de surveillance ont été données. Nous pensons que c'est simplement la capacité du système de contrôle à s'adapter rapidement à divers environnements. Il est donc nécessaire de concevoir des contrôleurs efficaces dans tous les environnements que l'on peut trouver. Ce type de problème survient lorsqu'il existe une grande incertitude quant aux dommages structurels dus à une défaillance du système ou à la présence de perturbations externes importantes ou de changements de point de consigne. Dans ce cas, le responsable du traitement doit identifier les circonstances spécifiques qui subsistent et prendre des mesures dans l'ordre approprié. Ceci est réalisé en améliorant les performances, et la stabilité est l'objectif de la conception de la surveillance. Ici, nous proposons une commande supervisée basée sur plusieurs modèles pour utiliser la commutation et l'adaptation afin d'améliorer les performances de contrôle du système.

### II.13. Les différentes techniques de la commande supervisée

Le terme supervision recouvre plusieurs concepts. Certains incluent des aspects de sécurité opérationnelle. Par conséquent, le rôle de la supervision est multiple. Il remplit les fonctions suivantes :

- Surveillance : Elle contribue à la sécurité, notamment en détectant les anomalies.
- Gestion des modes : elle gère l'état du système ainsi que les phases de transition, permettant de passer de l'état actuel au nouvel état,
- Management : S'assurer que les objectifs de production sont atteints dans des conditions optimales.

Deux types d'informations sont échangés entre le procédé, les lois de commande, et le superviseur :

- ✓ Le superviseur évolue conformément aux événements issus du procédé [17].

- ✓ Le superviseur intervient dans l'évolution du procédé au travers des lois de commande.

## **II.14. Modélisation par l'approche multi-modèle**

Les approches multi-modèles sont fréquemment rencontrées dans la littérature. Le principe est de représenter des systèmes dynamiques non linéaires par une combinaison de modèles linéaires ou affines valables dans le domaine de fonctionnement. De nombreux travaux se sont concentrés sur la décomposition de l'espace des caractéristiques d'un système en régions de fonctionnement, en choix de structure et en nombre de modèles locaux. Dans [19] Johansen et Foss ont proposé un modèle local linéaire de type ARMAX. Ces modèles locaux sont réglés en ligne à l'aide d'algorithmes d'estimation. Ceux-ci sont ensuite mélangés et pondérés par une fonction de validité qui définit d'une certaine manière la région de validation du modèle.

## **II.15. Commande multi-contrôleurs**

### **II.15.1. Limitations des stratégies de commande mono-contrôleur**

Étant donné que la plupart des processus physiques sont non linéaires, la synthèse des contrôleurs est généralement basée sur la méthode de Lyapunov. Malheureusement, il n'y a pas de procédure générale pour trouver des fonctions de Lyapunov candidates qui peuvent prouver la stabilité en boucle fermée de tout système non linéaire. Les techniques décrites ci-dessus présentent toutes des limites. En particulier, la commande de linéarisation est basée sur l'élimination exacte des non-linéarités. Ces dernières sont partiellement connues, et la commande adaptative ou robuste est considérée en les traitants comme des incertitudes paramétriques. Mais des conditions dures leur ont été imposées. Le backstepping (classique ou adaptatif) est apparu comme une alternative. Cependant, cette méthode est limitée aux systèmes triangulaires.

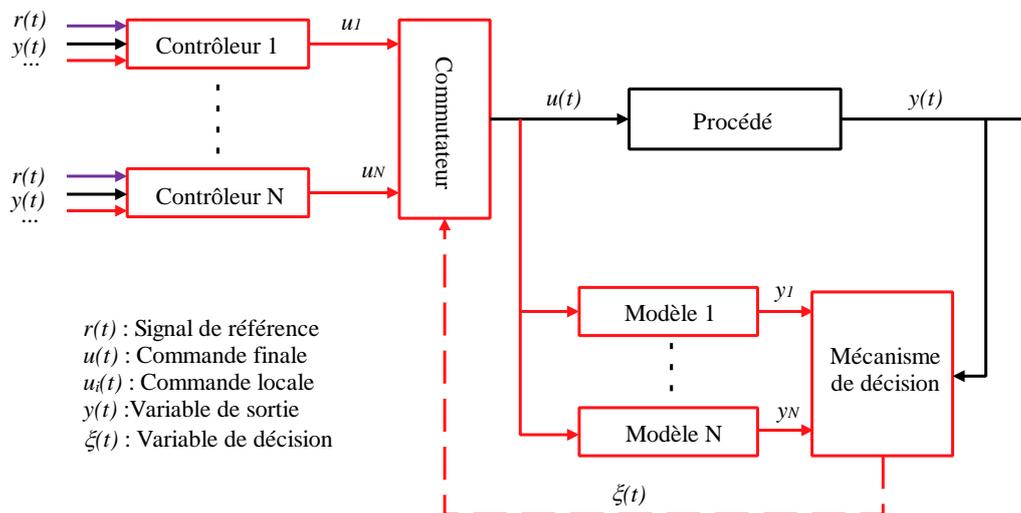
### **II.15.2. Concept général de la commande multi-contrôleurs**

Obtenir un modèle global de contrôle d'un système non linéaire donné n'est pas toujours aisé. Cependant, il est souvent possible d'avoir une compréhension partielle du processus. Par conséquent, nous supposons que nous pouvons connaître l'environnement dans lequel le système va évoluer. Si nous pouvions caractériser chacun de ces environnements et leur associer des contrôleurs locaux performants, le problème serait grandement simplifié. A titre d'exemple simple, si la non linéarité d'un système n'est pas discontinue mais lisse, un système non linéaire peut être approché par un modèle linéaire autour d'un certain nombre de points de fonctionnement. Ensuite, grâce à la théorie des systèmes linéaires, un contrôleur local peut être

synthétisé pour chaque point de fonctionnement. Cependant, son champ de validité par contrôleur est limité.

La première étape de la commande multi-contrôleur consiste à établir un ensemble fini, Chacun correspond à un environnement spécifique. L'une des ingéniosités des commandes multi-contrôleurs tient au fait que les contrôleurs locaux peuvent avoir des structures et des propriétés différentes. Nous introduirons les contrôleurs locaux adaptatifs dans le chapitre suivant pour approfondir ce concept.

La deuxième étape de la commande multi-contrôleur consiste à obtenir le signal de commande final (la commande réellement appliquée au procédé) à partir du signal de commande du correcteur local. Cette tâche est effectuée par l'interrupteur directement commandé par le superviseur. Ce dernier nécessite des informations : commandes, sortie de processus, variables système internes. Son rôle est double, d'une part, il indique au commutateur lorsqu'un basculement est nécessaire, et d'autre part, il aide ce dernier à choisir le contrôleur le mieux adapté pour garantir les performances spécifiées [17]. Le schéma général de la commande multi-contrôleurs est donné par la figure II.16.



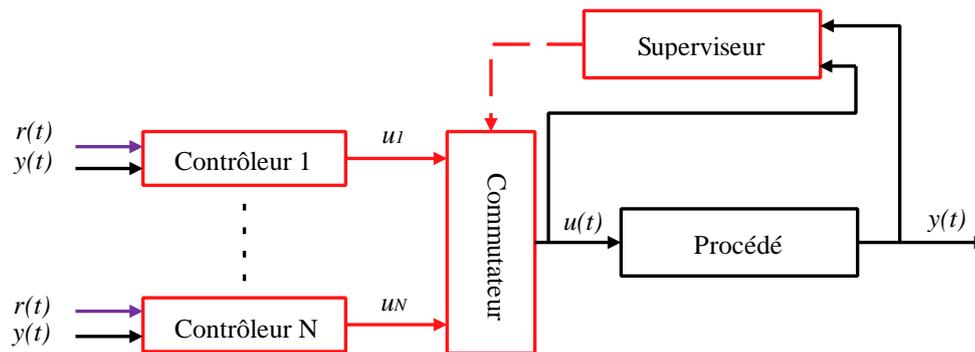
**Figure II.16** : Schéma de principe de la commande multi-contrôleurs

### II.15.3. Différentes structures de la commande multi-contrôleurs

Les différentes structures multi-contrôleurs sont répertoriées en deux classes, qui sont les suivantes :

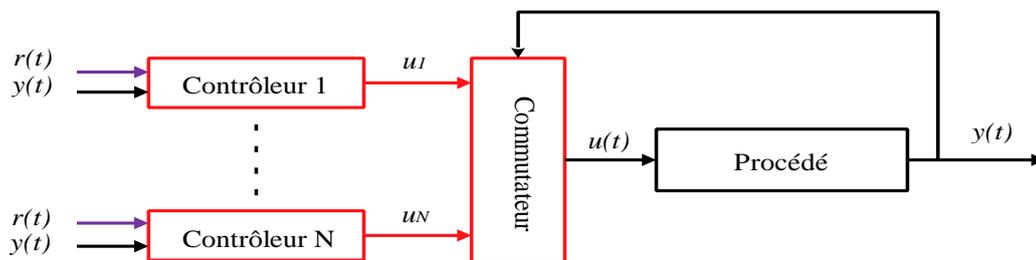
- **Classe indirecte** : le schéma global contient un superviseur qui envoie des informations au commutateur afin de sélectionner un ou plusieurs contrôleurs. La commutation est basée sur des informations reconstruites. En outre, le superviseur est capable de déterminer

l'environnement dans lequel évolue le système. Le schéma global de la commande multi-contrôleurs est présenté dans la figure II.17.



**Figure II.17 :** Schéma global de la commande multi-contrôleurs (classe indirecte)

- **Classe directe :** dans ce cas, le superviseur est absent. Le commutateur à partir d'informations mesurées (composante du vecteur d'état, paramètres internes, sortie du processus...) est capable de choisir par lui-même le ou les contrôleurs locaux les plus performants.



**Figure II.18 :** Schéma global de la commande multi-contrôleurs (classe directe)

## II.16. Commande supervisée basée sur multi-modèles et multi-contrôleurs

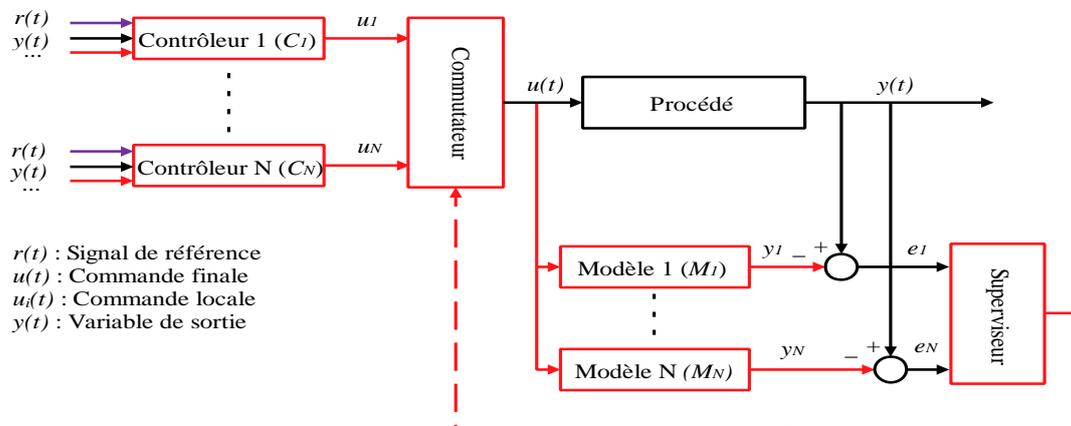
De plus en plus de systèmes de contrôle reposent sur une bonne compréhension du système contrôlé et de son environnement. En règle générale, la première étape de l'identification d'un système dynamique conduit à la construction d'un modèle structuré qui affiche explicitement les dépendances des paramètres. Lorsque les caractéristiques du système ne sont pas trop complexes (système linéarisé, ordre bas), la commande linéaire traditionnelle suffit à le contrôler. Cependant, il existe de nombreux systèmes avec des mécanismes physiques internes qui sont mal compris ou mal identifiés. Obtenir le modèle devient alors difficile à mettre en œuvre. L'utilisation de régulateurs linéaires simples est souvent abandonnée. Bien sûr, la non-linéarisation fournit automatiquement des alternatives.

Cependant, face aux problèmes rencontrés, les outils utilisés sont de plus en plus perfectionnés.

L'objectif est de le montrer dans les lois d'automatisme existantes. La commande supervisée basée sur multi-modèles et multi-contrôleurs est une alternative.

### II.16.1. Architecture de la commande supervisée basée sur multi-modèles et multi-contrôleurs

L'architecture de la commande supervisée proposée facilite la prise de décision liée aux actions de commande pour améliorer le fonctionnement du système de chauffage, caractérisé par diverses conditions de fonctionnement et généralement soumis à des perturbations externes. La structure de contrôle proposée contient plusieurs modèles, un générateur de signal de surveillance et une logique de commutation qui permettent de choisir le contrôleur approprié [17]. L'architecture est illustrée par la figure II.19.



**Figure II.19** : Schéma global de la commande multi-modèle multi-contrôleurs

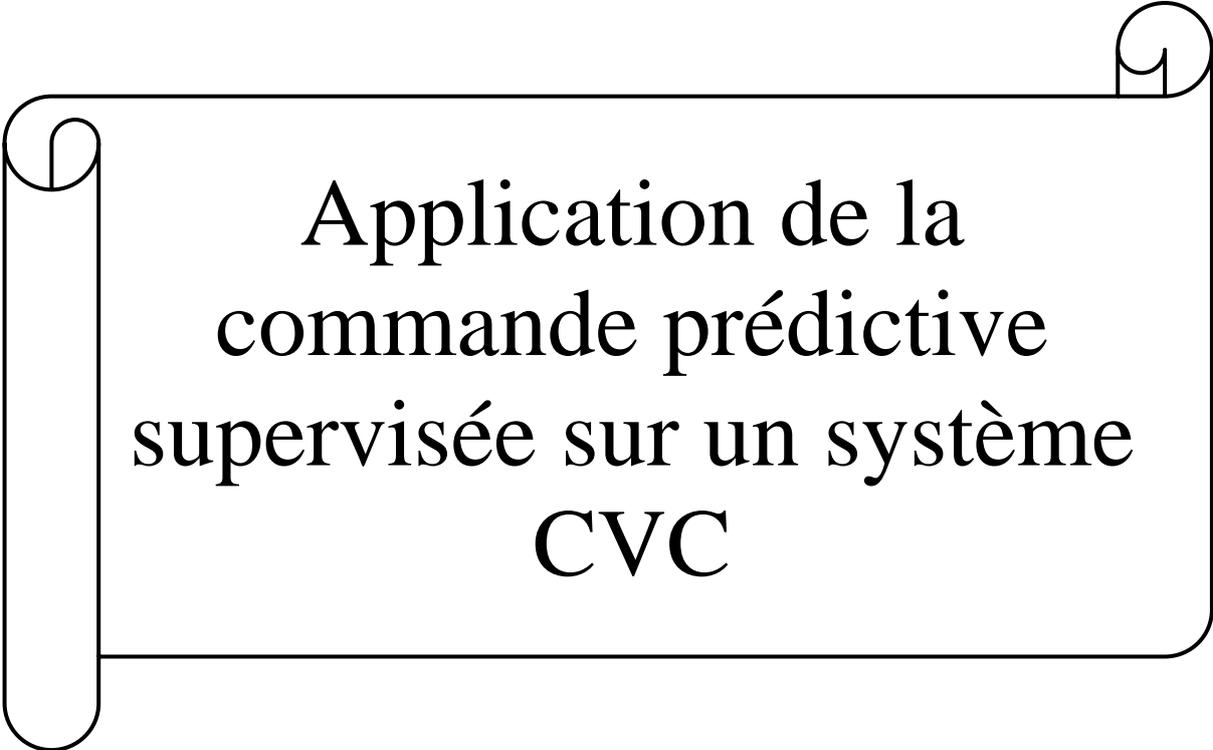
## II.17. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu de la commande de prédiction dans la première partie, puis de notre méthode de prédiction fonctionnelle, et de son fonctionnement. Les différentes techniques de contrôle supervisé ont été présentées dans la deuxième partie.

L'application de la commande prédictive fonctionnelle sur un système linéaire du second ordre a montré la capacité de la en de commande.

Le prochain chapitre sera consacré à l'application de la commande prédictive supervisée pour réguler la température ambiante dans un bâtiment.

## CHAPITRE III



Application de la  
commande prédictive  
supervisée sur un système  
CVC

### III.1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons exposer l'intérêt et les avantages de la commande prédictive supervisée, dans la première partie nous allons simuler le système pour différents cas sur une période de temps d'une journée (le changement brusque de nombres des occupants dans la pièce ainsi que leurs activités) dans le but de tester l'efficacité et la robustesse de l'approche proposée.

Dans la deuxième partie nous allons procéder à la commande supervisée basée sur les multi-modèles et les multi-contrôleurs afin de rendre notre système robuste au changement brusques des paramètres d'entrées, en identifiant quelques modèles (situations) ainsi que leurs contrôleurs.

### III.2. Les paramètres du système utilisés

Les différents paramètres utilisés sont illustrés dans le tableau III.1.

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

Entrées	Valeurs
$E_{vert1}$ [ $W/m^2$ ] et $E_{vert}$ [ $lux$ ]	Connectées à la météo
$Blind_{pos}$	1 (ouvert la journée)
$T_{ext}$ [ $^{\circ}C$ ]	La température extérieure.
$T_{upper}$ [ $^{\circ}C$ ], $T_{lower}$ [ $^{\circ}C$ ], $T_{adj}$ [ $^{\circ}C$ ]	La température résultante de la zone adjacente en contact avec (le plafond, le plancher, le mur).
$Q_{elec}$ [ $W$ ], $Q_{occ}$ [ $W$ ]	Gain de chaleur des équipements électriques
$Air_{in}$ [ $^{\circ}C$ , $g/kg$ , $PA$ , $kg/s$ ]	Connecté à la météo (variable)
Saturation	[0.5 1]

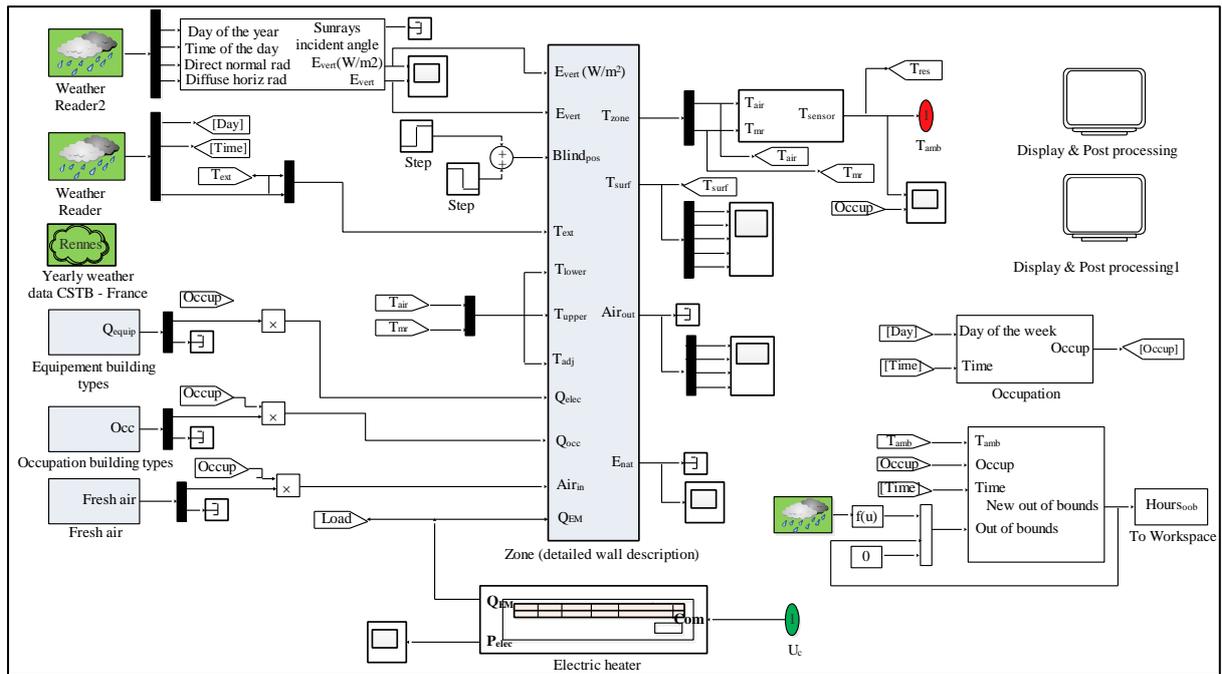


Figure III.1 : Chauffage d’une pièce avec des entrées reliées à la météo

### III.3. Identification du système chauffage bâtiment

L’application de la commande prédictive nécessite l’identification de système qui est la partie la plus difficile spécifiquement le système chauffage qui se définit comme un système non linéaire et aussi en raison de sa lenteur.

Afin d’appliquer la commande PFC, nous avons pris un modèle linéaire qui représente parfaitement le comportement du système chauffage.

Le modèle linéaire identifié est celui d’un troisième ordre défini par la fonction de transfert en continu suivante [20] :

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

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

### III.4. Application de la commande PFC

Le but principal de la PFC est la régulation thermique de la pièce à une valeur désirée et d’avoir un compromis entre le confort thermique et la consommation énergétique.

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

Les étapes pour calculer la loi de commande du PFC sont les suivantes :

### Etape 1 : Formulation du modèle interne

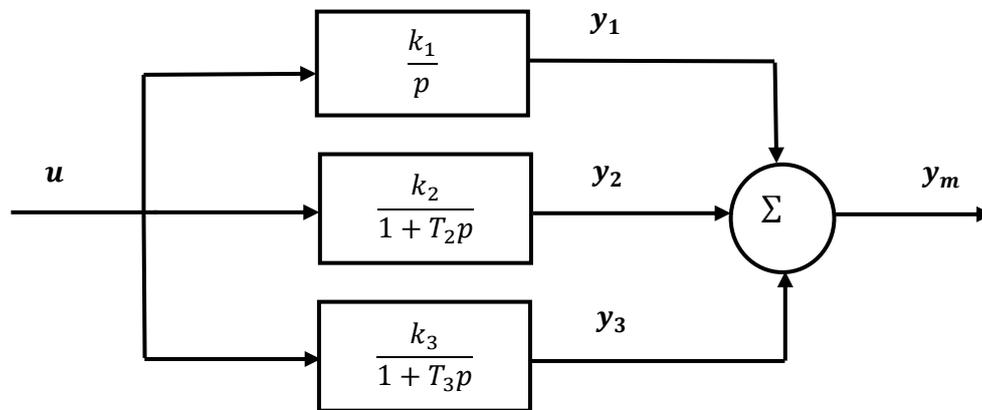
#### ▪ La décomposition du modèle

En décomposant l'équation III.1 on aura  $M_1$ ,  $M_2$  et  $M_3$  comme sous-modèles

$$G(p) = \frac{k_1}{p} + \frac{k_2}{1+T_2p} + \frac{k_3}{1+T_3p} \quad (\text{III.2})$$

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

La figure III.2 illustre cette décomposition parallèle du modèle :



**Figure III.2 :** Modèle interne parallèle

Comme le premier modèle est un intégrateur qui est instable on doit le décomposer en deux modèles  $M_{01}$  et  $M_{02}$  du premier ordre en parallèle [14].

Pour d'implémenter le modèle dans le calculateur de commande, nous effectuons une transformée en  $Z$  avec une période d'échantillonnage  $t_e = 70s$  et nous auront les résultats suivants :

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

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

### ▪ La sortie du modèle

La sortie globale du modèle  $y_M(k)$  est donnée par :

$$y_M(k) = y_1(k) + y_2(k) + y_3(k) \quad (\text{III. 3})$$

Avec :

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

$$y_2(k) = a_2 y_2(k-1) + k_2(1-a_2)u(k-1) \quad (\text{III. 5})$$

$$y_3(k) = a_3 y_3(k-1) + k_3(1-a_3)u(k-1) \quad (\text{III. 6})$$

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

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

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

### Etape 3 : Calcul de la sortie prédite

La sortie du modèle est donnée par l'équation :

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

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

La loi de commande est donnée par :

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

### Paramètres du régulateur PFC

Les différents paramètres du régulateur PFC sont présentés ci-dessous :

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

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 a un  $H$  lointain, et on a pu constater que la valeur de  $T_{Bf} = 4000s$  assure un bon résultat pour la commande.

## III.5. Simulation du système

Pour tester l'efficacité de la méthode proposée, nous allons appliquer dans 3 cas différents un changement brusque des paramètres d'entrées de notre système.

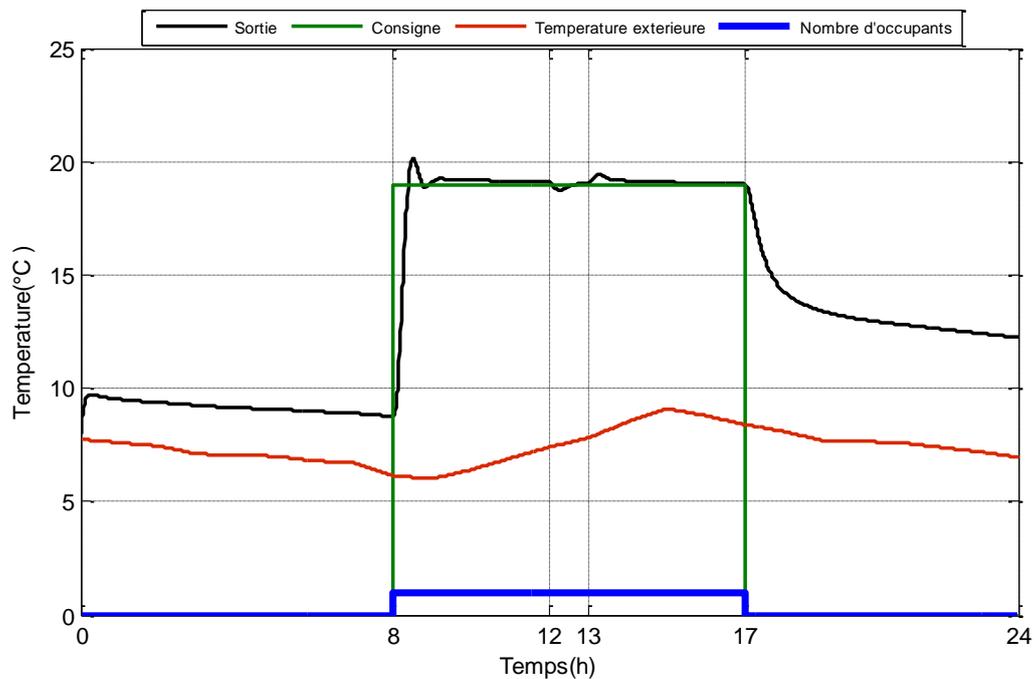
### a. Premier cas

Dans ce premier cas nous allons choisir les paramètres qui sont indiqués dans le tableau III.2 comme étant de 8 :00 à 13 :00, il n'y a qu'un seul occupant qui est en mouvement dans la pièce pour voir la réaction de notre système, nous illustrons la réponse dans la figure III.3.

**Tableau III.2** : Paramètre d'entrée du système

Donnée météorologique	Rennes, France
Nombre d'occupant	1 personne
Etat des occupants	En mouvement
Temps de simulation	24 h
Période d'occupation	8h00 : 17h00

Après la simulation de notre système nous avons obtenu la sortie illustrée dans la figure III.3.



**Figure III.3** : Réponse du système.

### b. Deuxième cas

Dans ce deuxième cas, nous gardons les mêmes paramètres jusqu'à 13h et nous faisons entrer 5 personnes dans la pièce pour voir la réaction de notre système. La réponse du système est représentée dans la figure III.4.

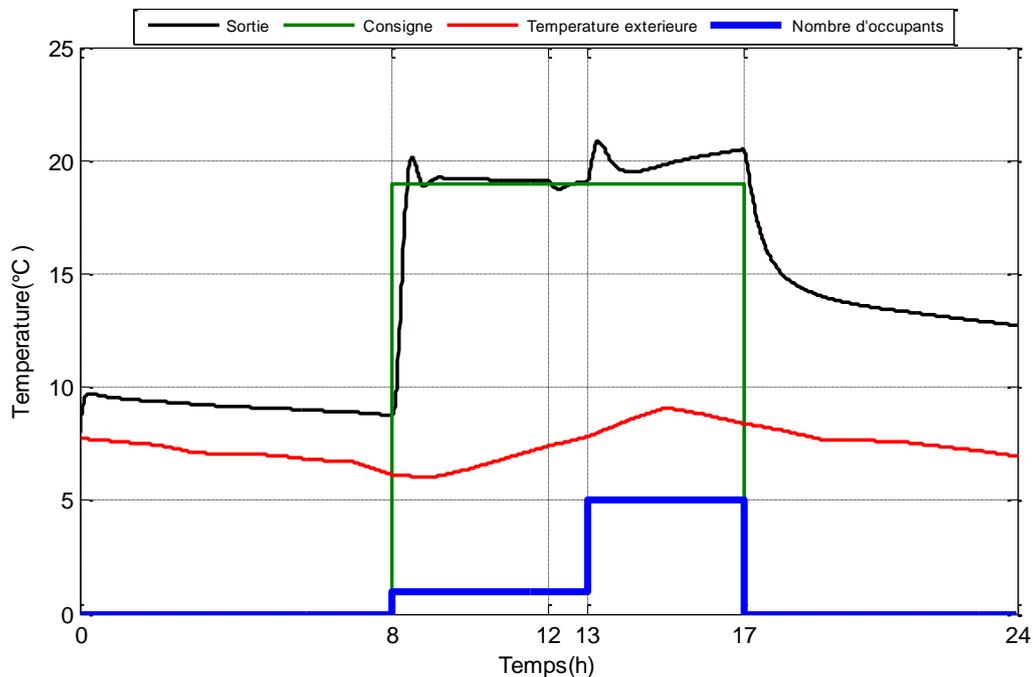
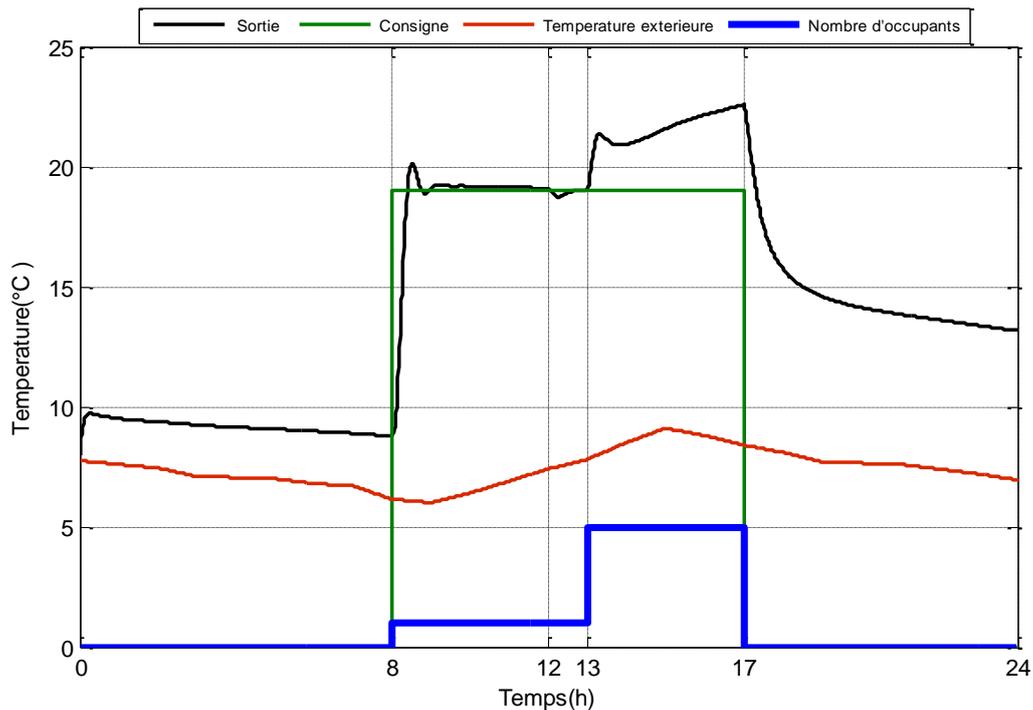


Figure III.4 : Réponse du système

### c. Troisième cas

Dans ce cas-là, nous allons laisser les mêmes paramètres jusqu'à 13h et nous faisons entrer 5 personnes à l'intérieur de la pièce mais en modifiant l'activité des occupants (en état de travail). La réponse du système est représentée dans la figure III.5.



**Figure III.5 : Réponse du système**

### III.5.1. Interprétation des résultats

Dans la figure I.3 nous remarquons que la sortie suit bien la consigne ce qui signifie que notre système agit très bien et que notre PFC est fiable dans ce cas.

Dans les figures I.4 et I.5 nous remarquons qu'à partir de 13h la sortie diverge de la consigne et nous constatons que notre commande ne répond pas aux changements brusques à cause de changement d'activités et le nombre important d'occupants .

La partie suivante comprend l'introduction et l'application de l'approche proposée.

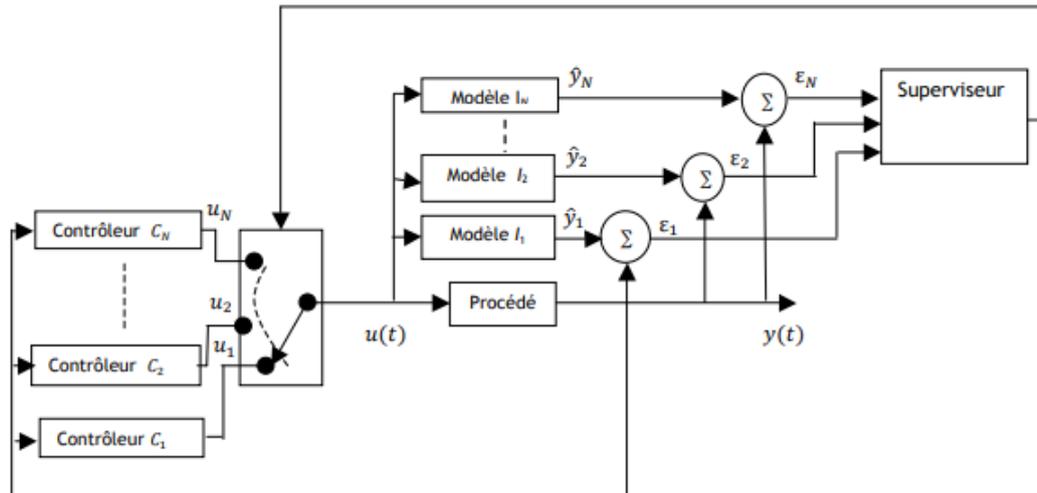
## II.6. Application de la commande supervisée sur le système

### II.6.1. Commande supervisée basée sur les multi-modèles et les multi-contrôleurs

L'idée principale de cette commande est de placer un superviseur qui choisit le meilleur modèle parmi l'ensemble des modèles connus du procédé, et de faire la commutation entre les contrôleurs afin de mettre en marche le contrôleur correspondant.

### III.6.2. Architecture du système de commande

L'architecture de la commande supervisée est illustrée dans la figure III.6.



**Figure III.6 :** Architecture de la commande supervisée basée sur les multi-modèles et multi-contrôleurs

Le procédé à commander a comme entrée  $u(t)$  et sortie  $y(t)$ . Le système de commande contient 3 modèles placés en parallèle, et un superviseur qui sélectionne le contrôleur adéquat.

Sachant que les différents environnements possibles sont connus a priori, alors il reste à choisir le nombre, la structure des modèles et les contrôleurs. Le but de ces commandes est de déterminer les règles de commutation appropriées et adaptation pour de meilleures performances tout en assurant la stabilité du système. L'architecture ainsi décrite est très générale et peut être utilisée pour des systèmes linéaires et non linéaires.

### III.6.3. Choix des modèles et contrôleurs

Le choix entre les modèles et les contrôleurs nécessite une logique pour décider vers quel contrôleur commuter et quand, c'est pourquoi nous utilisons un superviseur qui sert à choisir le modèle correspondant à partir de l'erreur calculée, qui va envoyer une information au commutateur pour qu'il sélectionne le contrôleur adéquat.

## III.7. Application de la commande supervisée basée sur les multi-modèles et les multi-contrôleurs sur notre système

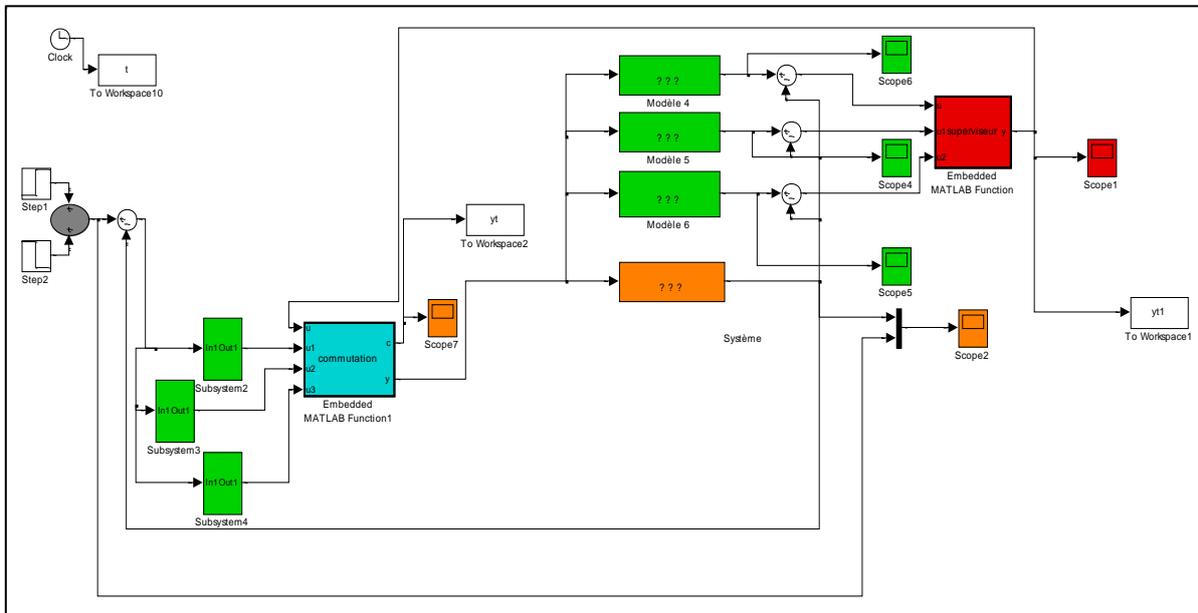
### III.7.1. Description de la commande sous Matlab/Simulink

Pour appliquer notre commande il est nécessaire de faire une architecture des différents blocs Simulink, donc pour notre commande nous allons prendre comme configuration :

- Trois contrôleurs

- Trois modèles
- Un superviseur
- Un commutateur

L'architecteur de notre commande est illustré dans la figure III.7



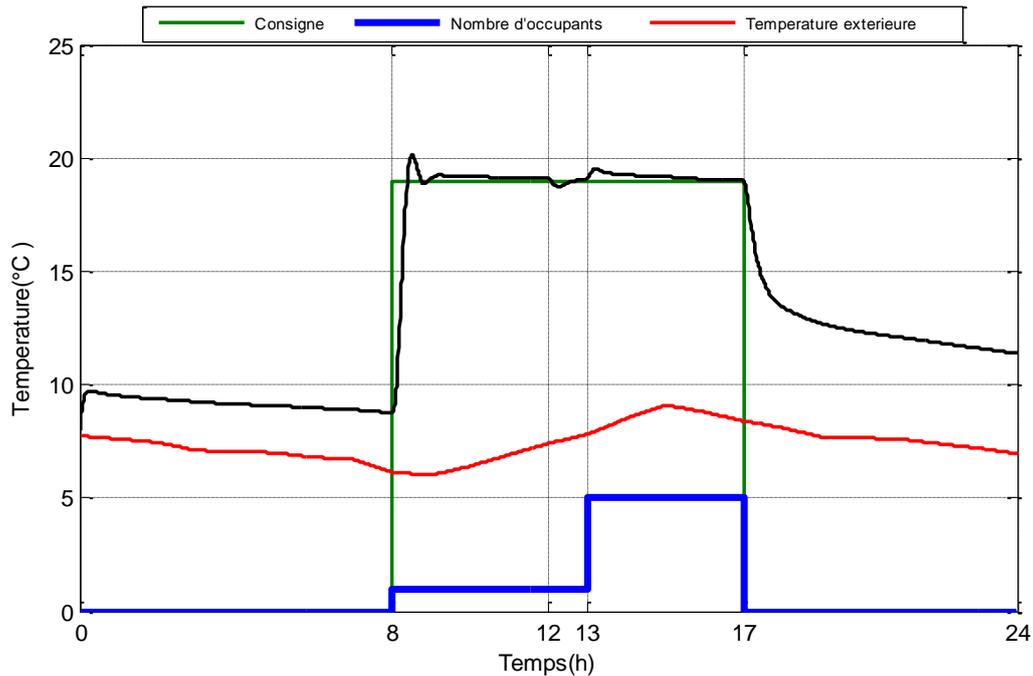
**Figure III.7 :** Schéma de la commande multi-modèle, multi contrôleur implémentée sous Matlab/Simulink

### III.7.2. Résultats de simulation

Pour tester l'efficacité de notre commande, nous allons simuler trois cas de notre système, les deux premiers cas sont les mêmes que la première partie de ce chapitre, et le troisième cas est pour but de tester la robustesse et l'efficacité de la méthode proposée à d'autres scénarios.

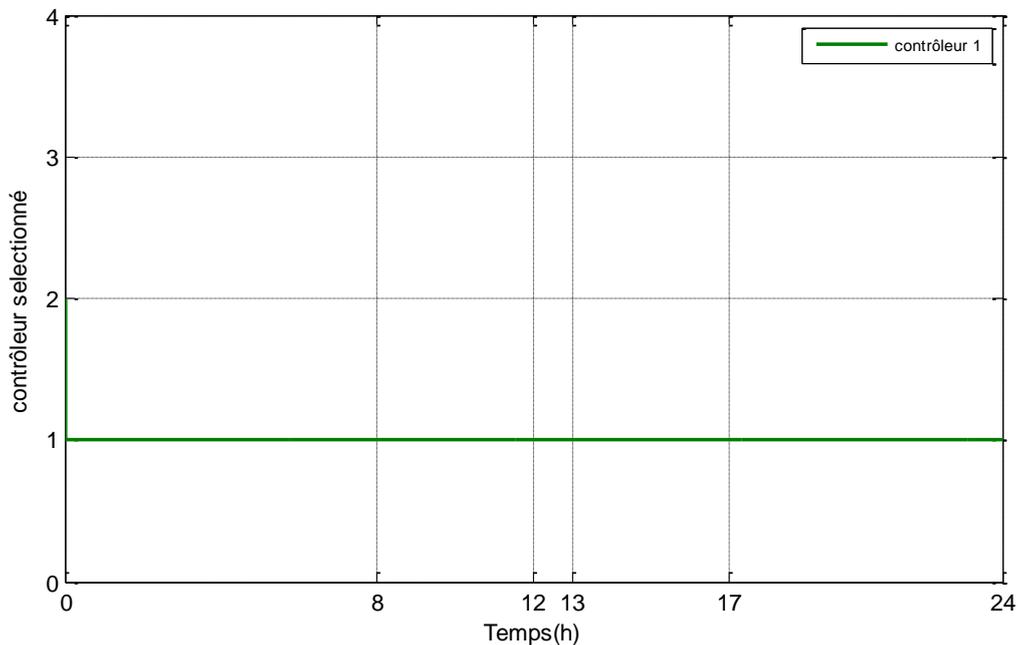
- **Premier cas**

En allant de 8h jusqu'à 13h, nous avons qu'un seul occupant (en mouvement) dans la pièce, puis à partir de 13h nous aurons 5 occupants (en mouvement), les résultats de la simulation sont illustrés dans la figure III.8.



**Figure III.8 :** Sortie du système

Le contrôleur sélectionné est représenté dans la figure III.9.

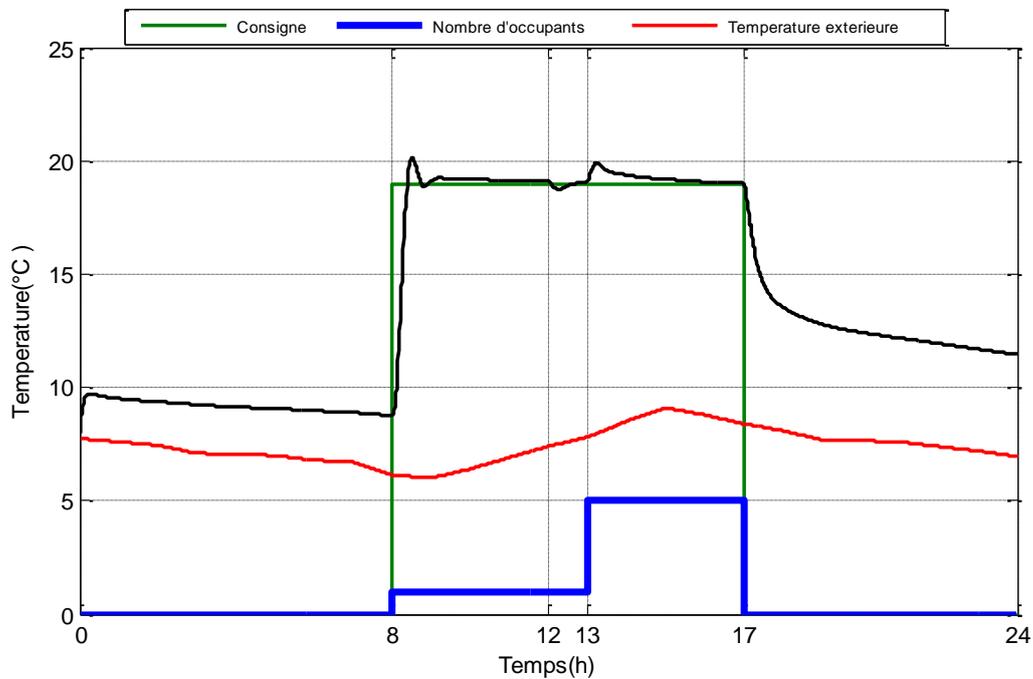


**Figure III.9 :** Contrôleur sélectionné par le superviseur

D'après les figures III.8 et III.9 on observe que la sortie du système suit la consigne avec des petites erreurs et on constate que le superviseur sélectionne le premier contrôleur pour la raison que notre cas est approprié au premier modèle.

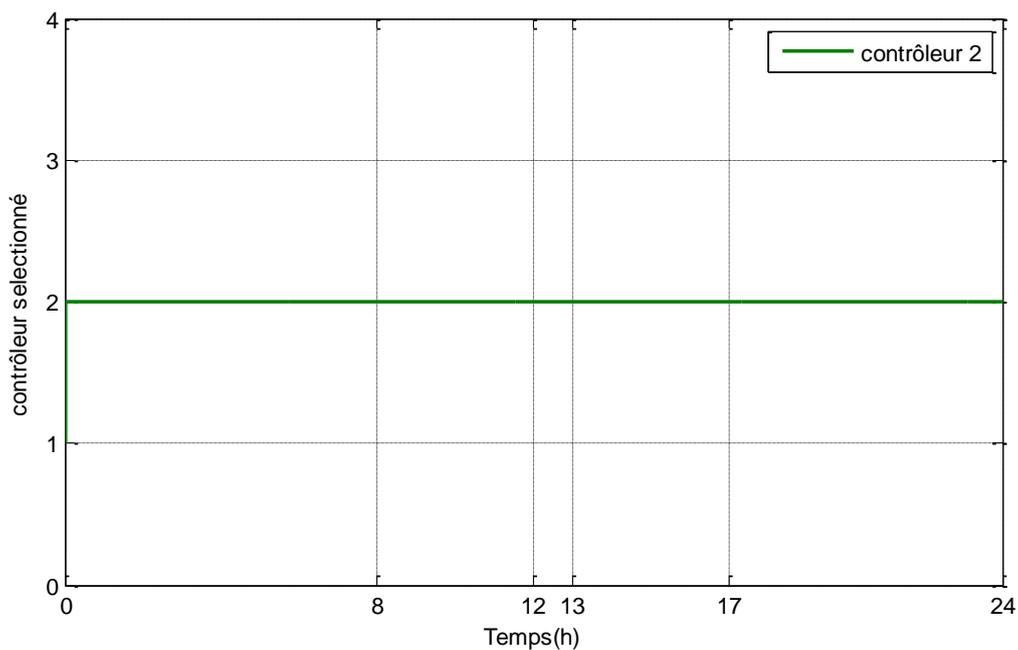
- **Deuxième cas**

De 8h à 13h, nous avons toujours qu'un seul occupant (en mouvement) dans la pièce et puis à partir de 13h il y'aura 5 occupants (en état de travail), les résultats de la simulation sont présentés dans la figure III.10.



**Figure III.10** : Sortie du système

Le contrôleur sélectionné est représenté dans la figure III.11.



**Figure III.11** : Contrôleur sélectionné par le superviseur

D'après les figures III.10 et III.11, nous observons que la sortie du système suit la consigne avec des petites erreurs et on constate que le superviseur sélectionne le deuxième contrôleur (notre cas est approprié au deuxième modèle).

### III.7.3. Etude de la robustesse

Dans le but de tester la robustesse et l'efficacité de notre commande, il est nécessaire de simuler le système pour un scénario, différent des situations définies précédemment.

Donc notre cas est le suivant : de 8h jusqu'à 12h il n'y aura que deux occupants (assis) dans la pièce, puis à partir de 13h il y aura 6 occupants (qui travaillent) les résultats de simulation nous ont donné les figures suivantes :

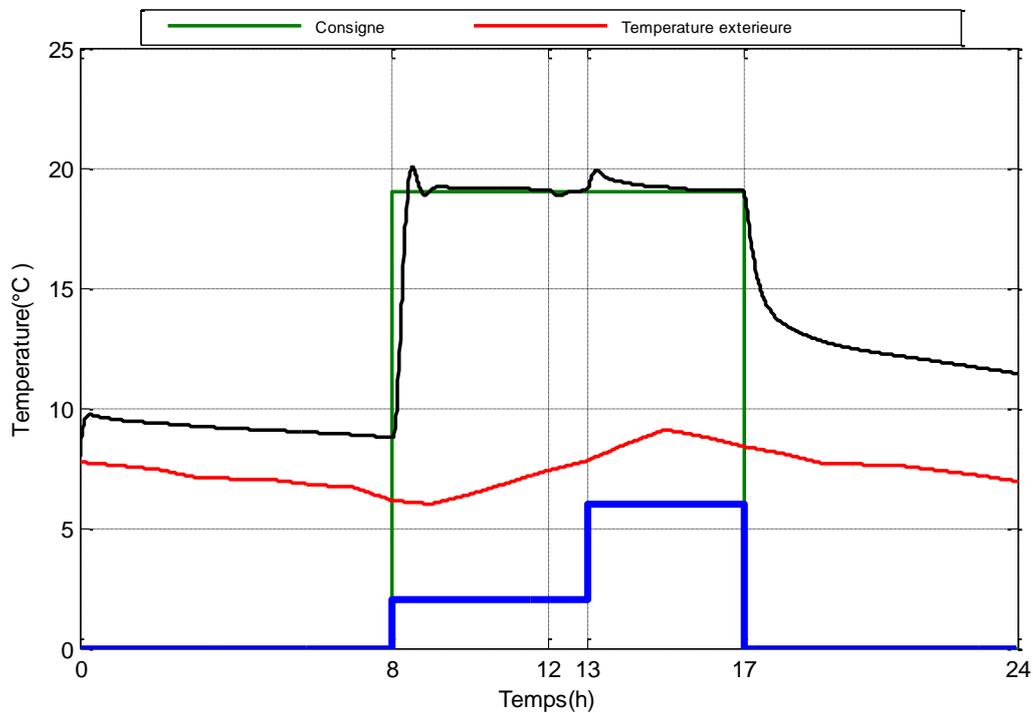
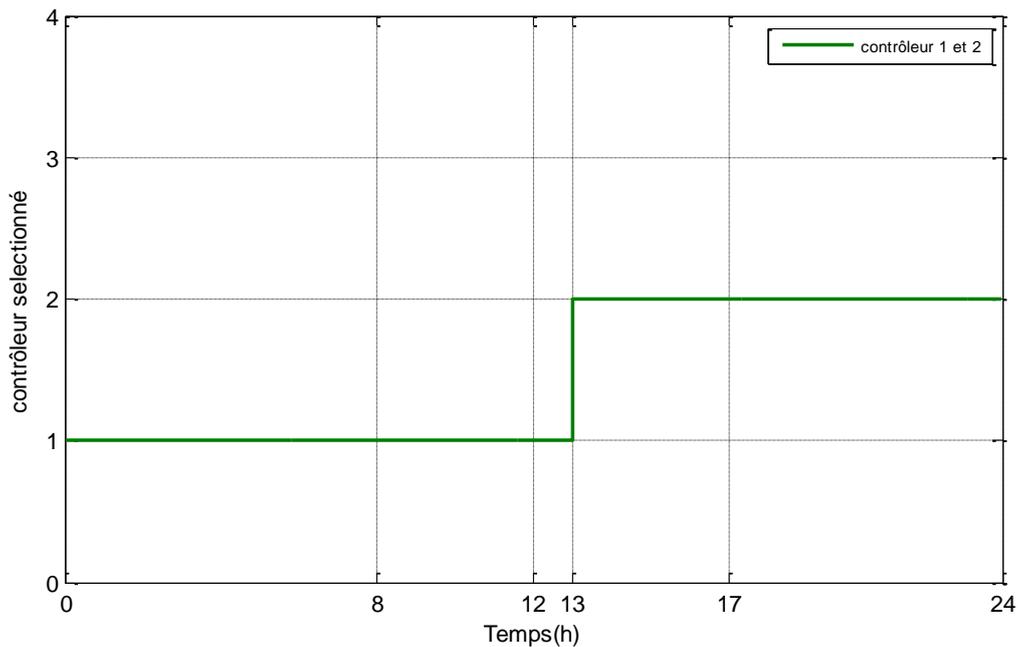


Figure III.12 : Sortie du système



**Figure III.13** : Contrôleur sélectionné par le superviseur

#### III.7.4. Interprétation des résultats

D'après les figures III.8 et III.10, nous remarquons que la sortie du système (température ambiante de la pièce) suit la consigne (température souhaitée) avec des petites erreurs en raison des changements brusques du nombre d'occupants et de leurs activités. Nous constatons également que le superviseur sélectionne à chaque fois le contrôleur correspondant, comme le montrent les figures III.9 et III.11.

Pour la figure III.12, nous remarquons qu'à partir de 8h la sortie du système suit la consigne parfaitement jusqu'à 13h, à partir de cette heure nous observons une petite perturbation due au changement important du nombre d'occupants, La figure III.13 nous informe sur le contrôleur sélectionné par le superviseur.

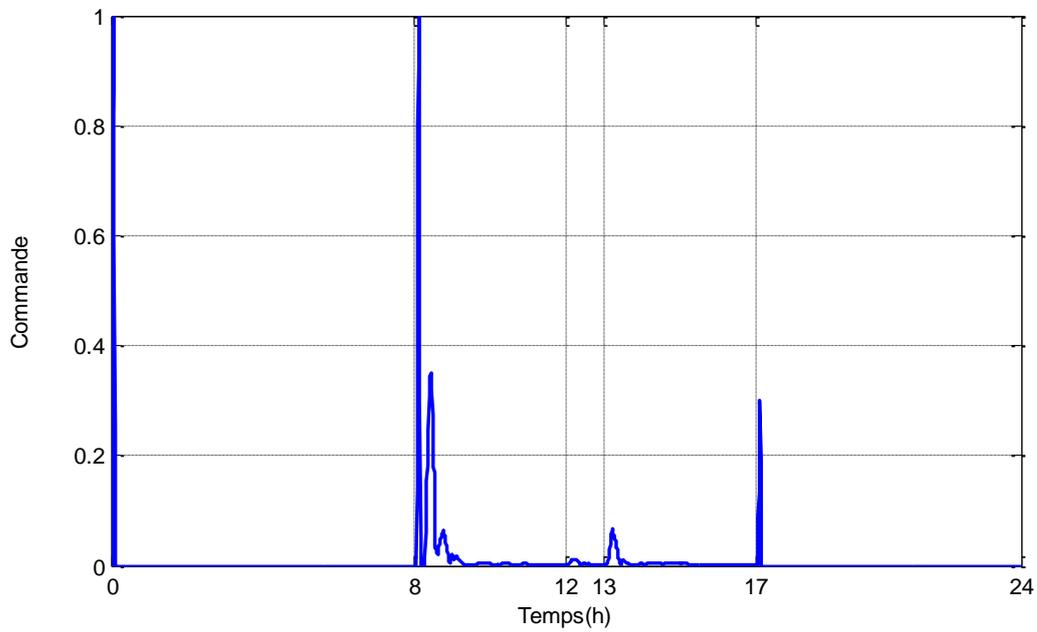
### III.8. Représentation graphique des différents indices

Pour vérifier l'efficacité de la méthode proposée, il est nécessaire de visualiser ces indices de performance, qui nous indiquent la consommation d'énergie, le confort et la stabilité de commande, qui sont définis comme :

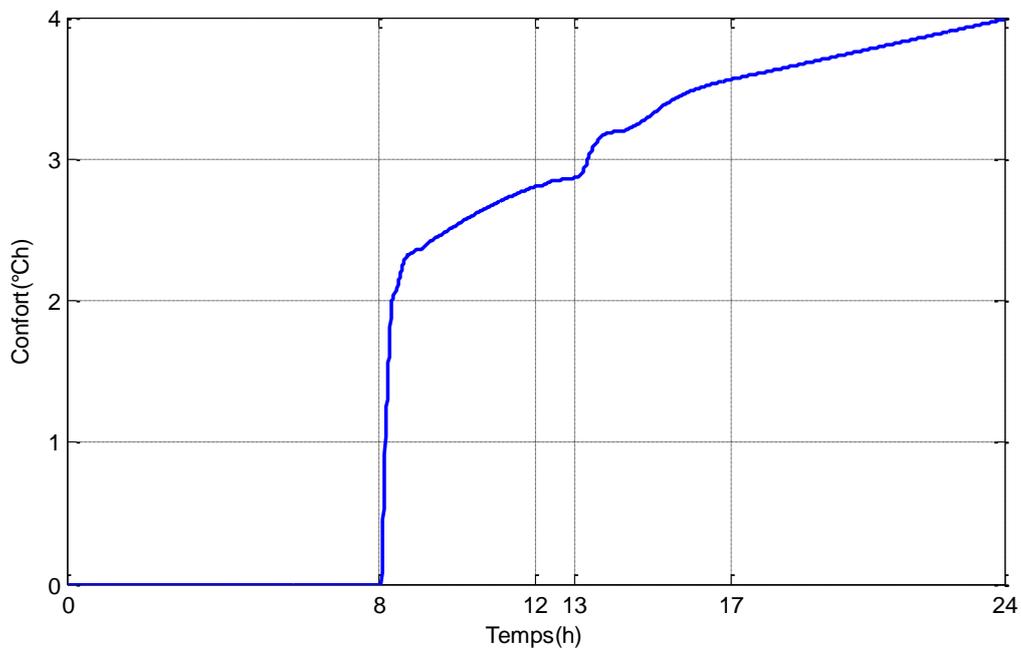
- La consommation : indique l'énergie consommée lors de l'activation du chauffage.
- Le confort : l'erreur entre la consigne (la température désiré) et la sortie système pendant la période d'occupation.

- La stabilité de la commande : correspond à une moyenne pondérée entre deux valeurs consécutives du signal de commande.

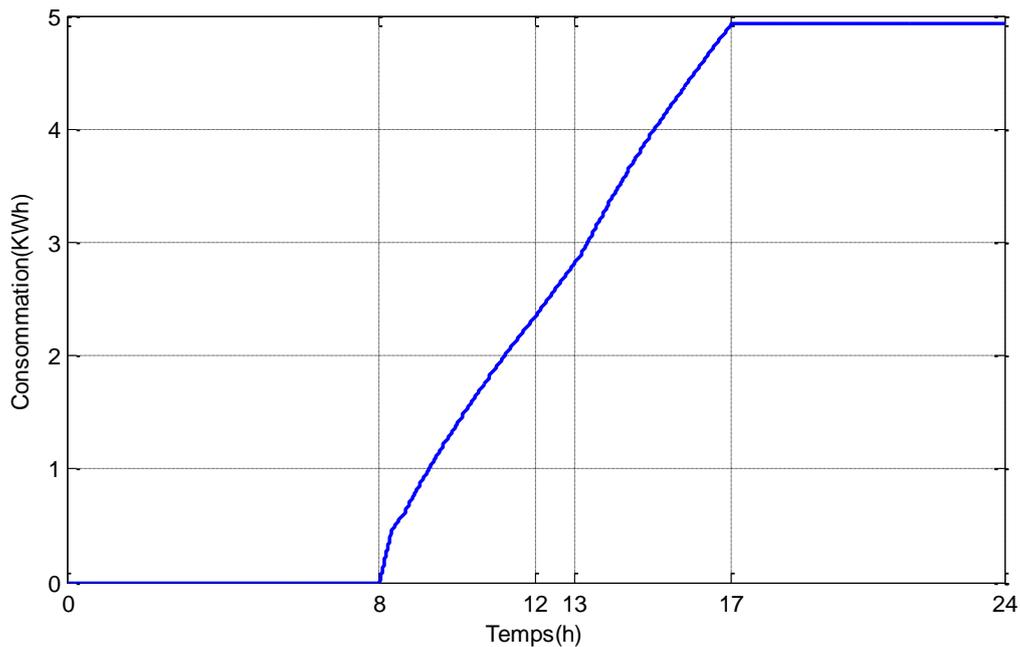
Les différents indices sont donnés par les figures III.14, III.15 et III.16.



**Figure III.14** : Représentation graphique de l'indice de stabilité de la commande



**Figure III.15** : Représentation graphique de l'indice de confort



**Figure III.16** : Représentation graphique de l'indice de consommation

### III.8.1. Interprétation des résultats

D'après la figure III.14 nous remarquons qu'à partir de 8h (début de la période d'occupation) la commande présente des faibles oscillations puis elle se stabilise durant la période d'occupation, on peut donc en déduire que la commande est stable.

La figures III.15 représente l'indice de confort nous remarquons que de 8h jusqu'à 8h30 la valeur de cet indice augmente rapidement ceci est causé par le grand écart entre la température ambiante et la consigne et à partir de 8h30 la valeur de cet indice augmente légèrement, cela est dû au bon suivi du point de consigne.

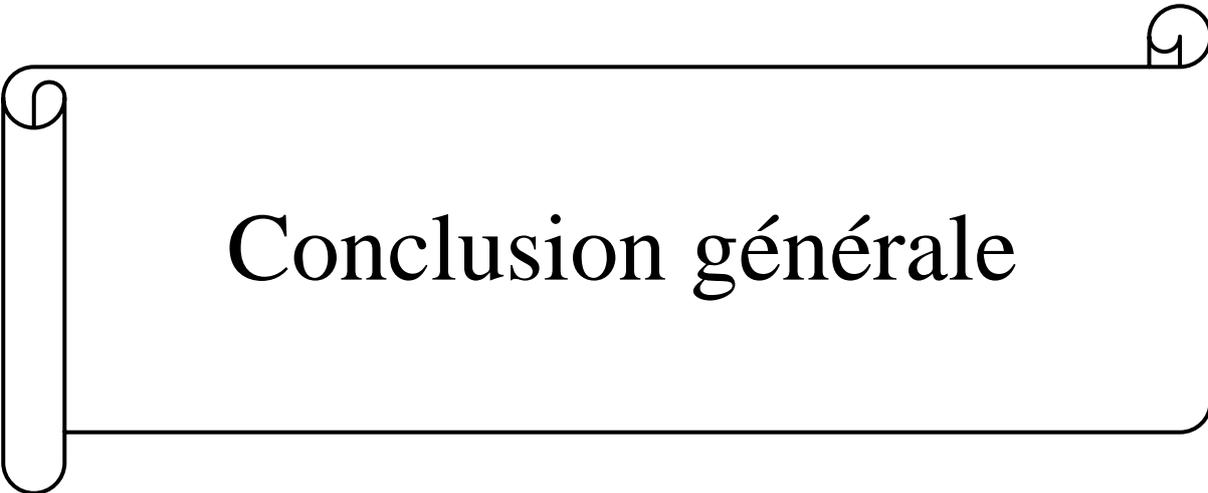
La figure III.16 représente l'indice de consommation, nous remarquons que de 8h jusqu'à 17h (la période d'occupation) une monté jusqu'à sa stabilisation à 4,9 kWh, qui est due à l'activation du chauffage.

### **III.9. Conclusion**

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons simulé notre système pour trois cas où il y avait un changement brusque des paramètres d'entrées, ce qui nous a permis de voir que notre contrôle PFC perdait sa robustesse et son efficacité dans de telles situations.

Afin de rendre notre commande robuste aux changements des paramètres d'entrées, nous nous sommes intéressés dans la deuxième partie de ce chapitre à la commande prédictive supervisée basée sur les multi-modèles et multi-contrôleurs.

Les résultats des simulations ont montré la validité et l'efficacité de cette commande pour la régulation thermique de la pièce et la satisfaction du confort des occupants, c'est pourquoi il est intéressant de choisir cette commande pour contrôler ce type de système.



Conclusion générale

## Conclusion générale

L'ensemble de ce mémoire est consacré à l'étude de la régulation thermique des bâtiments à travers l'exploration d'une nouvelle stratégie capable de s'adapter aux différentes conditions de fonctionnement pour réduire la consommation d'énergie et assurer un bon confort thermique aux occupants. La méthodologie est d'utiliser une commande prédictive supervisée qui a montré son efficacité dans la régulation de la température ambiante de la pièce.

Avant de commencer l'étude de la commande, nous avons réalisé au premier chapitre une simulation en boucle ouverte d'un système de chauffage bâtiment, qui nous a permis d'observer que la température ambiante de la pièce dépend de plusieurs paramètres géométrique, climatique et énergétiques.

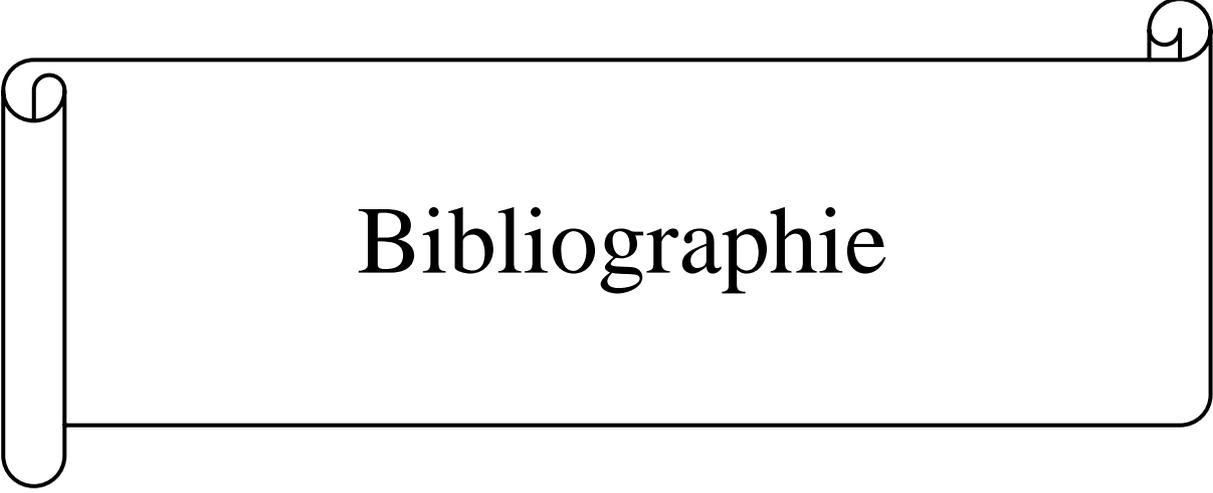
Dans le deuxième chapitre, nous avons donné un aperçu de deux commandes utilisées dans le domaine du chauffage des bâtiments, la méthode de prédiction fonctionnelle et la commande supervisée, dans la première partie de ce chapitre, nous nous sommes concentrés sur la PFC, son fonctionnement et ses principes. Une simulation sur un système du second ordre pour prédire le comportement du système, puis dans la deuxième partie de chapitre nous avons introduit la commande supervisée, après cela nous avons décrit brièvement les différentes techniques de cette commande.

L'apport principal de notre travail apparaît dans le dernier chapitre sur l'application de la commande prédictive supervisée selon une approche multi-contrôleurs et multi-modèles, et des simulations sur trois scénarios, les résultats obtenus montrent l'efficacité et la robustesse de cette stratégie de contrôle.

Pour les perspectives nous envisageons comme extensions pour notre travail :

- Utilisation de la commande prédictive supervisée intelligente (l'exploitation des techniques de l'intelligence artificielle comme exemple, les réseaux de neurones).
- L'extension de la commande prédictive supervisée : comment gérer plusieurs pièces par exemple, cas d'un bâtiment multizones.

D'un point de vue applicatif, les perspectives visent généralement l'application de l'approche proposée sur un bâtiment réel.



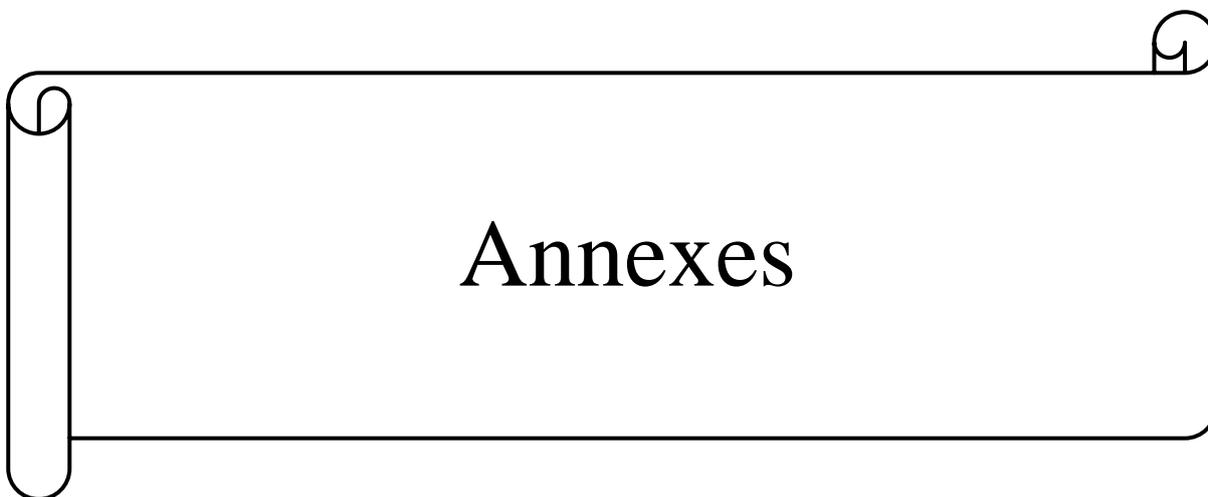
**Bibliographie**

---

## Bibliographie

- [1] J.DULAC, T.ABERGEL, Annales des Mines –Responsabilité et environnement, ISSN 1268-4783, DOI 10.3917/re1.090.0017, 2018/2 N° 90 | pages 17 à 21.
- [2] L.PEREZ-LOMBARD, J.ORTIZ & C. POUT, A review on buildings energy consumption information. Energy and buildings, 40(3), 394-398, 2008.
- [3] Algérie presse service, [mercredi,13 février 2019], Le secteur du bâtiment, premier consommateur d'énergie en Algérie , [https://www.aps.dz/economie/85470-le-secteur-du-batiment-premier-consommateur-d-energie-en-algerie#:~:text=ALGER%2D%20Le%20secteur%20du%20b%C3%A2timent,l%C3%A9nergie%20\(Aprue\)](https://www.aps.dz/economie/85470-le-secteur-du-batiment-premier-consommateur-d-energie-en-algerie#:~:text=ALGER%2D%20Le%20secteur%20du%20b%C3%A2timent,l%C3%A9nergie%20(Aprue))
- [4] Global Alliance for Buildings and Construction [2020], Rapport sur la situation mondiale des bâtiments et de la construction en 2020, [https://globalabc.org/sites/default/files/2021-01/Buildings-GSR-2020\\_ES\\_FRENCH.pdf](https://globalabc.org/sites/default/files/2021-01/Buildings-GSR-2020_ES_FRENCH.pdf)
- [5] A.TOUIL, S.MERGHACHE,»Au sujet de l'efficacité énergétique -vers des bâtiments moins énergivores". Diplôme de master en génie Civil. Tlemcen. 2017.
- [6] A. HUSAUNDEE, D. JREIJRY, J.R. MILLET, J.G. VILLENAVE & J.C. VISIER. «Developing virtual laboratories for the design and test of ventilation control strategies», 2003.
- [7] P.D.MOROŞAN, R.BOURDAIS, D.DUMUR & J.BUISSON,(2010). Building temperature regulation using a distributed model predictive control. Energy and Buildings, 42(9), 1445-1452. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.03.014>
- [8] N. HANNACHI-BELKADI, Développement d'une méthodologie d'assistance au commissionnement des bâtiments à faible consommation d'énergie, Université Paris Est, thèse de doctorat, 2008.
- [9] A.OUARET. « Commande supervisée des systèmes de chauffage bâtiment à grande échelle», thèse de doctorat, Université de Bejaia, juillet 2021.
- [10] B.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.
- [11] N,OUALI ,LAKHDAR, DJAGHDALI. « Commande prédictive directe du couple de la machine asynchrone» thèse de doctorat, Université Mohamed Khider Biskra, Algérie, 2012.
- [12] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Commande\\_pr%C3%A9dictive#R%C3%A9f%C3%A9rences](https://fr.wikipedia.org/wiki/Commande_pr%C3%A9dictive#R%C3%A9f%C3%A9rences), consulté le 15/05/2022.

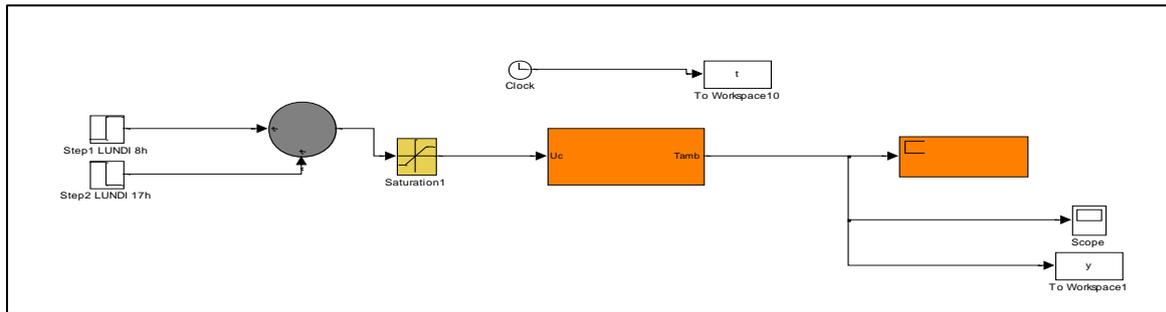
- [13] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Commande\\_pr%C3%A9dictive](https://fr.wikipedia.org/wiki/Commande_pr%C3%A9dictive), consulté le 15/05/2022.
- [14] N, OUALI, J.RICHALET. Pratique de la commande prédictive,. Paris: éditions Hermès, 1993.
- [15] N, OUALI, H. FALLAHSOHI, Modélisation dynamique des échangeurs diphasiques, appliquée aux groupes frigorifiques contrôlés par une commande avancée, thèse doctorat Institut national des sciences appliquées de Lyon, France, 26 Avril 2011
- [16] A.RAMDANI, Commande prédictive des systèmes dynamiques : étude comparative avec les régulateurs classiques. Mémoire de magister université M'Hamed Bougara Boumerdes, Algérie, 2014.
- [17] H. LEHOUCHE, Commande Supervisée des Systèmes Hybrides, thèse de doctorat, Université de Bejaia, juillet 2013.
- [18] M.CHUAN, W. M. WONHAM, "Non blocking Supervisory Control of State Tree Structure", Lecture notes in control and information sciences, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2005.
- [19] T.A. JOHANSEN, A. B. FOSS, "Non linear Local Model Representation for Adaptive Systems", IEEE International Conference on Intelligent control and instrumentation vol. 2, pp. 677-682, 1992.
- [20] P.D.MOROŞAN, R.BOURDAIS, H GUEGUEN. «Apports de la commande prédictive pour la régulation thermique des bâtiments.» Traitement de l'information et de l'environnement : 479-492, 2010



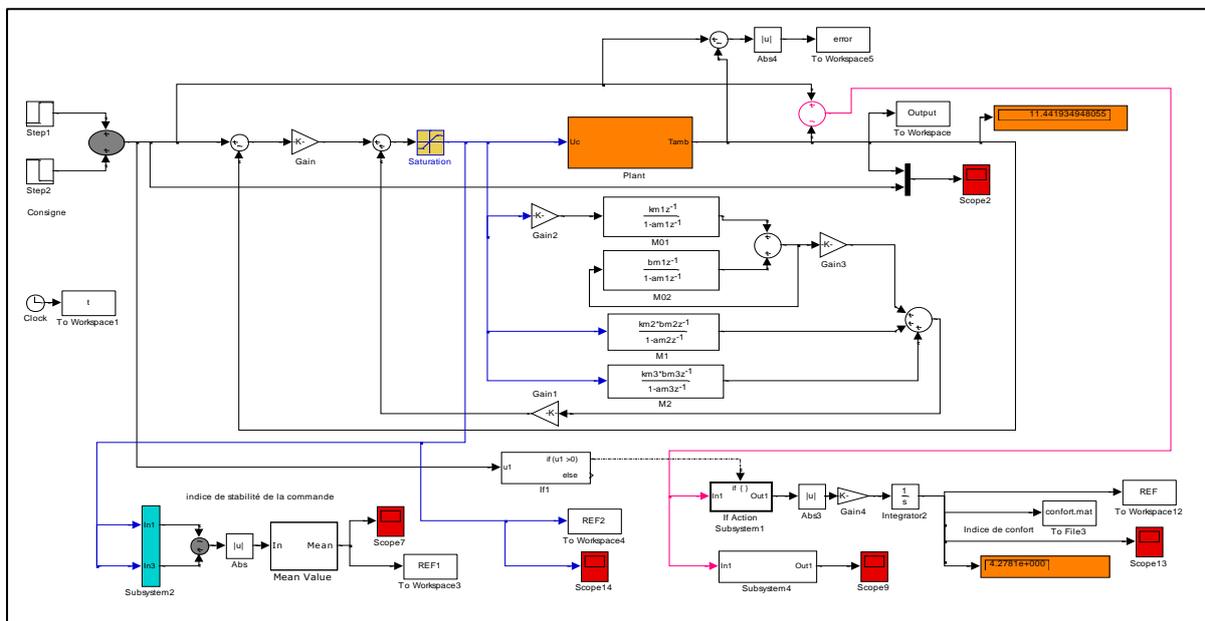
# Annexes

## Annexes

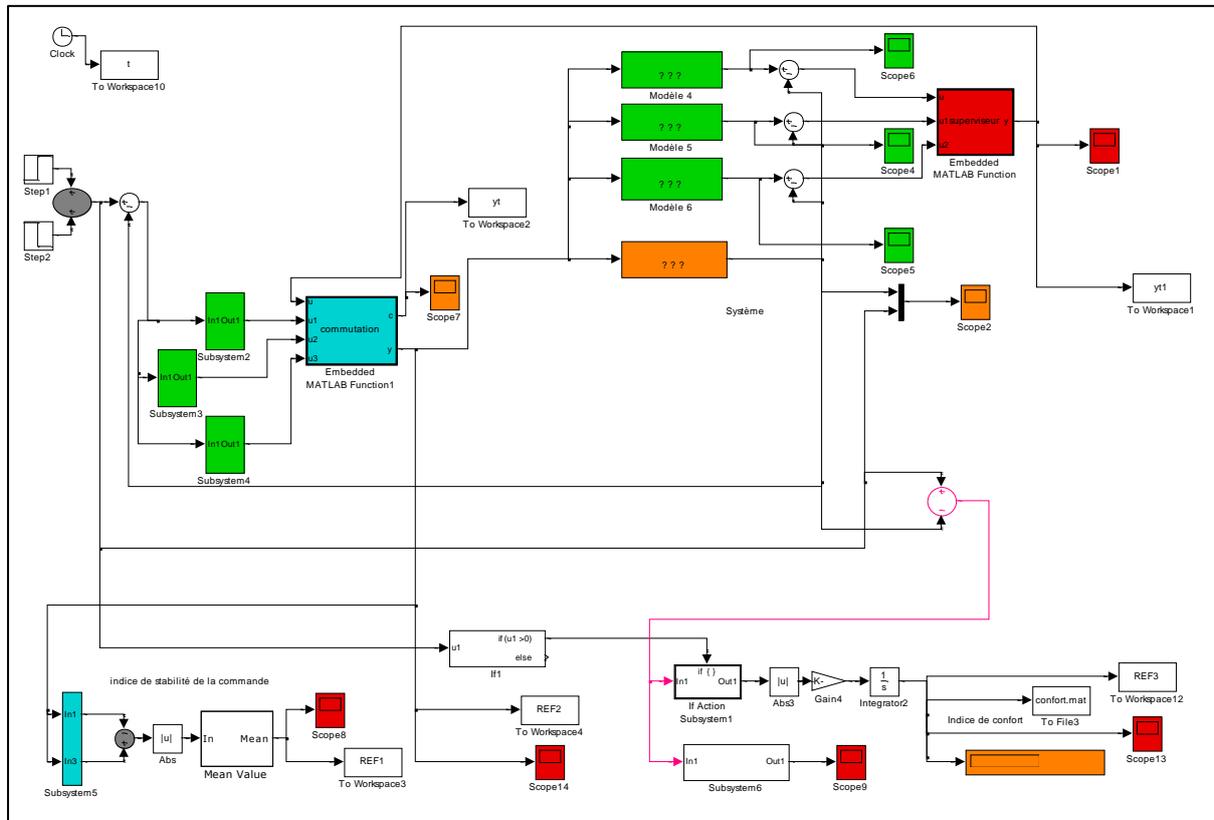
## Annexe 1 : Simulation en boucle ouverte



## Annexe 2 : La commande prédictive fonctionnelle



## Annexe 3 : La commande supervisée basée sur le multi-modèles et multi-contrôleurs



## **Commande prédictive supervisée d'un système de chauffage, de ventilation et de climatisation**

**Résumé :** Ce manuscrit présente le développement d'une stratégie de commande prédictive supervisée appliquée au système de chauffage bâtiments qui peut s'adapter à différentes conditions de fonctionnement pour réduire la consommation d'énergie et assurer un bon confort thermique aux occupants. L'idée principale derrière cette approche est d'utiliser plusieurs contrôleurs et plusieurs modèles pour surmonter les limites de l'utilisation d'un seul contrôleur et faire face à différentes perturbations. La méthode proposée est basée sur l'utilisation de la commande prédictive fonctionnelle. Le cas étudié est un bureau dans un bâtiment, qui est considéré comme un processus complexe non linéaire tiré de la boîte à outils SIMBAD intégrée dans Matlab. La stratégie développée dans ce travail permet de réguler la température ambiante au sein d'un bureau tout en réduisant la consommation d'énergie en s'assurant que la température souhaitée est bien contrôlée. Les résultats obtenus démontrent l'importance et l'efficacité de la méthode proposée.

**Mots-clés :** Consommation d'énergie, confort thermique, chauffage bâtiment, commande prédictive supervisée, commande prédictive fonctionnelle.

## **Supervised predictive control of a heating, ventilation and air conditioning system**

**Abstract :** This manuscript presents the development of a supervised predictive control strategy applied to building heating system that can adapt to different operating conditions to reduce energy consumption and ensure good thermal comfort for occupants. The main idea behind this approach is to use multiple controllers and multiple models to overcome the limitations of using a single controller and cope with different disturbances. The proposed method is based on the use of functional predictive control. The studied case is an office in a building, which is considered as a nonlinear complex process taken from the SIMBAD toolbox integrated in Matlab. The strategy developed in this work makes it possible to regulate the ambient temperature within an office while reducing energy consumption by ensuring that the desired temperature is well controlled. The results obtained demonstrate the importance and effectiveness of the proposed method.

**Keywords :** Energy consumption, thermal comfort, building heating, supervised predictive control, predictive functional control.